

УДК 550.837:551, 550.372 (477)

**ПРОГРАММНАЯ ОБОЛОЧКА ОБЪЕДИНЕНИЯ
НЕЗАВИСИМЫХ ПОДСИСТЕМ ОБРАБОТКИ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

**Николаев И. Ю., Арутюнян Р. М., Николаев Д. Ю.,
Жулковский Г. В.**

(УкрНИМИ НАН Украины, г. Донецк, Украина)

Рассмотрены этапы обработки данных магнитотеллурических зондирований в единой программной оболочке.

Stages of data processing of magnetotelluric soundings in a unified programmatic shell are considered.

При проведении длительных наблюдений методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) регистрируются большие объемы временных вариаций магнитного поля (более 690000 отсчетов на каждой точке наблюдений). Результаты съемки регистрируются в файлах особой структуры и помещаются в локальную базу данных. Для их углубленной обработки используется программное обеспечение, разработанное группой MTSOFT в лаборатории МТ-исследований Института геоэлектромагнитных исследований РАН – система PRC_MTMV [1]. Она состоит из модуля автономного препроцессинга с конвертацией данных в компактный двоичный формат, универсальной подсистемы робастной обработки больших массивов магнитотеллурических и магнитовариационных данных в однотоочечных и двухточечных системах наблюдений, блока визуализации и автономных модулей трансформации скалярного и тензорного импеданса на основе дисперсионных соотношений амплитуды и фазы.

Указанное программное обеспечение реализует различные методы обработки магнитотеллурических данных и оформлено в

виде независимых подсистем, разработанных в едином стиле с согласованными структурами входных и выходных данных и общими элементами системного, интерактивного и графического дизайна. Подсистемы можно объединять в сложных графах анализа магнитотеллурических данных. Такой подход обеспечивает гибкое развитие и взаимодействие с другими программными продуктами. Характерным признаком этих программ является интерактивно-графическая реализация сложных алгоритмов, обеспечивающая оптимальную согласованность наукоемких формализованных алгоритмов с геофизическим опытом и интуицией интерпретатора.

Алгоритмы препроцессинга магнитотеллурических временных рядов, спектрального анализа временных интервалов фиксированной длины, расчета авто- и взаимоспектральных плотностей и дальнейшей оценки передаточных операторов с построением доверительных интервалов оценивания изложены в многочисленных публикациях и инструкциях к программам [2 – 4].

Особое внимание уделяется технологии робастного сглаживания частных оценок передаточных операторов и дальнейшего усреднения их значений для серии спектральных окон разной длины. Предложены эффективные способы синхронизации записей при использовании референсных схем наблюдений (RR) и дальнейшее усреднение оценок передаточных операторов в схеме RR для серии разных удаленных баз [5, 6].

Основные процедуры, связанные с получением результатов, сведены в блок визуализации, который позволяет всесторонне проанализировать и графически представить передаточные операторы электромагнитного поля, полученные программами обработки и помещенные в базу данных.

В этой подсистеме реализуются различные схемы осреднения и коррекции вводимых данных, и осуществляется расчет различных систем инвариантных параметров передаточных операторов. Например, для тензора импеданса определяются экстремальные амплитудно-фазовые значения, параметры трехмерности среды и др.

В программах подсистемы применяются как традиционные, так и новые методы расчета и анализа инвариантных параметров передаточных операторов, такие как:

- традиционная схема вращения тензора импеданса;
- схема сингулярного анализа Эггерса [7];
- схема анализа Спитца [8];
- схема максимальной индукции Менвилля;
- робастные методы отбраковки и осреднения данных [3];
- методы трансформаций импеданса в значения кажущегося электрического сопротивления для горизонтально анизотропной среды [9].

В блоке визуализации предусмотрена возможность записи результатов обработки – оценок передаточных операторов – во внутреннем алфавитно-цифровом формате в файл базы данных. Этот формат позволяет легко редактировать данные с помощью стандартных редакторов текстовых файлов и переносить результаты на другие машины. С его помощью обеспечивается сохранение результатов на машинном носителе для последующего автоматизированного анализа и графического представления.

Основным компонентом файлов базы данных является блок данных – значений некоторого передаточного оператора (например, тензора импеданса) в зависимости от частоты, полученных в результате обработки по выбранной процедуре фиксированного интервала магнитотеллурической записи в определенной точке зондирования. Блок данных содержит также погрешности определения значений передаточного оператора, дополнительные векторные и скалярные параметры качества обработки, режимные параметры, служебные директивы и комментарии. Блок однозначно идентифицируется в пределах файла цифровым индексом – номером варианта данных (в диапазоне 1-32000). В результате обработки одной магнитотеллурической записи с помощью одной процедуры в результирующем файле может быть получена большая совокупность блоков данных для разных передаточных операторов.

Графическими средствами подсистемы блока визуализации обеспечивается визуализация данных на произвольной шкале периодов (до 89 дискретных значений), а также возможность про-

ещирования результатов с разнородных сеток периодов на одну итоговую сетку. Результаты представляются в виде наборов графиков на билогарифмических и полулогарифмических бланках и карт изолиний.

Обработка данных текущей точки МТЗ в рамках системы PRC_MTMV проходит в несколько этапов.

Этап 1. Преобразование входного файла в LEMI-формате во входные файлы подсистемы, не зависящих от типа регистрирующей аппаратуры.

Этап 2. Автономный препроцессинг и форматные преобразования входных файлов временных рядов электромагнитного поля.

Этап 3. Последовательный спектральный анализ интервалов записи (серии записей) фиксированной длины, расчет и частотное сглаживание взаимных и автоспектров, оценка одноточечных передаточных операторов магнитотеллурического поля (импеданса и типпера), отбраковка интервалов с низким качеством линейных связей компонент поля на основе когерентностных критериев, взвешенное робастное сглаживание частных оценок передаточных операторов по всем отображенным интервалам записей, построение доверительных интервалов оценивания с использованием частотных характеристик каналов.

Этап 4. Оценка и визуализация осредненных по серии записей кажущихся электросопротивлений в текущей точке МТЗ с выводом результатов в лист-файл.

Применительно к методике профильных полевых наблюдений МТЗ, использованной в отделе электромагнитных методов исследований при проведении полевых работ, для объединения независимых подсистем обработки точечных массивов в единый модуль была разработана программная оболочка MT-LEMI-GRAPH, обеспечивающая автоматическое формирование входных файлов с параметрами обработки, необходимых подсистеме блока визуализации. Для работы оболочки средствами табличных редакторов создается текстовый файл, состоящий из 4-х столбцов. В первом из них заносится корень имени временного файла, как результата съемки методом МТЗ, во втором и третьем – координаты точки, в последнем – номер точки.

Первым шагом инициализации модуля обработки является загрузка информационного файла с данными координат, значениями абсолютных отметок точек МТЗ и датой проведения наблюдений. Этого достаточно для поиска рабочего каталога с текстовыми файлами временных рядов. После считывания они конвертируются в определенный формат и загружаются в подсистему PRC_MTMV. Параллельно формируется управляющий файл, содержащий имя точки, пространственные координаты, схему ориентации установки. Значения амплитудно-частотных характеристик измерительных каналов установки загружаются в отдельный файл. Управляющие входные данные, определяющие граф обработки, формируются в табличном файле, при этом по умолчанию задается команда стандартной обработки. Пользователь может задать другой режим обработки путем замены соответствующих параметров.

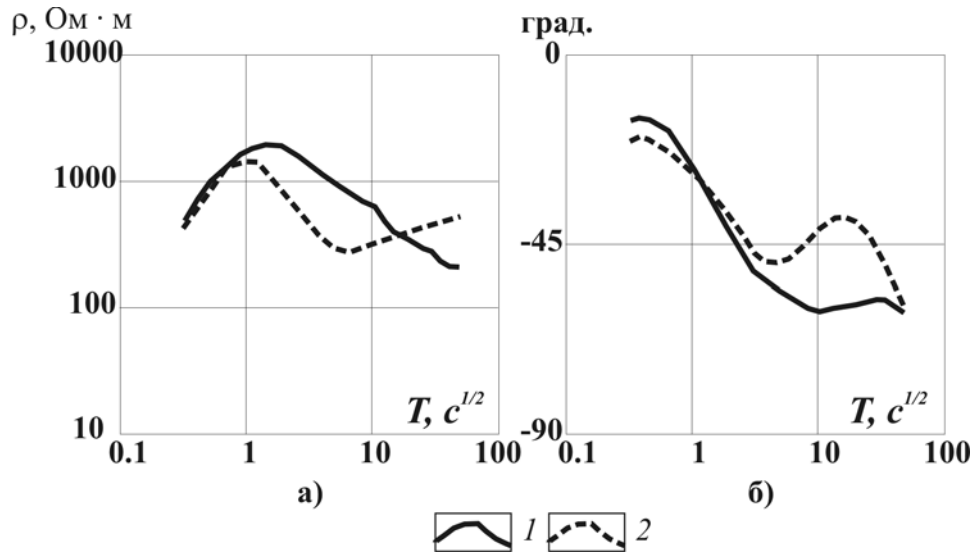
Вышеперечисленные файлы формируются для всех точек профиля. Затем в режиме пакетной обработки вызываются исполняемые модули подсистемы, преобразующие серию временных рядов из формата исходных данных в файлы временных рядов. Далее подключается автономная программа препроцессинга, визуализации и переформатирования временных рядов. Она позволяет визуально контролировать результаты препроцессинга и отбраковки интенсивно зашумленных участков записи. После корректировки временных рядов загружается основная процедура обработки. Файл форматируется автоматически с выбором режима стандартной обработки по умолчанию. Пользователь имеет возможность открыть этот файл и внести поправки с расширением режима обработки, включая оценивание импеданса, горизонтальных магнитных операторов, магнитовариационных векторов и др. Рекомендации по планированию и оптимизации процесса обработки путем ввода соответствующих команд в управляющий файл достаточно подробно описаны в руководстве пользователя системой обработки данных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, прилагаемых к программным продуктам.

В итоге для каждой точки наблюдений формируется файл результатов обработки с серией перекрывающихся по частотной

оси оценок передаточного оператора для разных временных окон. После исчерпания всех точек текущего профиля список этих файлов выводится на главную форму программной оболочки, и интерпретатор имеет возможность визуального просмотра графиков передаточных функций и соответствующих трансформаций после инициализации последнего звена системы блока визуализации.

Используя файл результатов обработки, подсистема блока визуализации осуществляет многоуровневое робастное определение оценок оператора для разных временных окон. Алгоритм и способы его реализации описаны в работах [10-12]. В этой же подсистеме применяются новые методы расчета и анализа инвариантных параметров передаточных операторов по схеме вращения тензора импеданса методом Эггерса, по схеме анализа Спитца и максимальной индукции Менвилля. Для расчета значений кажущегося электросопротивления используются формулы применительно к горизонтально анизотропной среде [9]. Все результаты систематизируются в выходном листинге.

В целях оптимизации дальнейшего процесса формирования графических приложений и упрощения структуры выходных файлов программная оболочка загружает значения частот и соответствующих им значений импеданса, кажущегося электросопротивления, фазы и других параметров в табличные массивы. Это дает возможность отказаться от процедур открытия-закрытия файлов и использования дискового пространства для хранения промежуточных результатов. Программная оболочка позволяет в удобной векторной форме инициировать просмотр графика любого параметра по выбору интерпретатора. Амплитудные и фазовые графики могут быть сформированы в графическом окне как для отдельной произвольной точки наблюдения (рис. 1), так и для всего профиля. Для оценки компактности всего ансамбля амплитудных кривых может быть рассчитана и выведена на экран совместно с другими локально-нормированная кривая (рис. 2).



1 – поперечная компонента; 2 – продольная компонента

Рис. 1. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ

Двумерные зависимости распределения амплитудных, фазовых и других параметров от периода наблюдений и положения точки наблюдений на профиле обычно иллюстрируются вертикальными разрезами соответствующих параметров. Для интерполяции параметров, полученных при произвольной сети наблюдений, в узлы равномерной сети с определенным шагом используют триангуляцию Делоне для выпуклых многоугольников. Каждая точка при использовании этого алгоритма занимает определенную площадь. В случае неравномерного распределения точек эта площадь уменьшается на участках с высокой плотностью точек наблюдений.

Алгоритм интерполяции по этому методу использует взвешенное среднее значение соседних наблюдений, где вес пропорционален заимствованной площади этих точек. В этом случае подчеркиваются локальные особенности распределения параметров с выделением зон разломов. Другим важным свойством указанного метода является то, что он не экстраполирует значения на узлы сетки, размещенные вне области наблюдений.

Программная оболочка позволяет использовать и другие методы интерполяции. Это метод расчета обратно пропорциональ-

ный расстоянию от узла до точки наблюдения, крайгинг и метод минимальной кривизны.

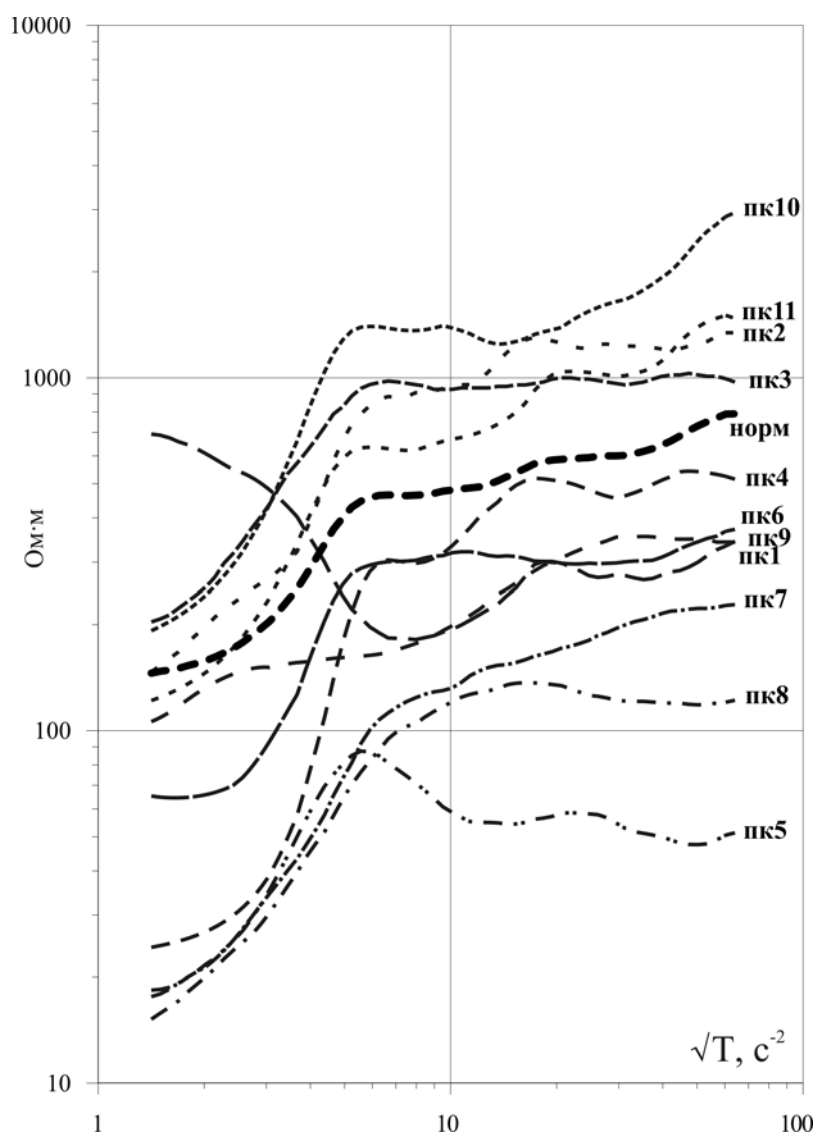


Рис. 2. Графики амплитудных кривых по профилю «Фастовский»

Особенности этих интерполяторов описаны в [13], а в программную оболочку они введены с целью экспериментального выбора нужного интерполятора для подчеркивания особенностей геоэлектрического разреза. На геоэлектрических разрезах (рис. 3), приведенных в качестве примера, очень четко выделены границы блоков с контрастными значениями кажущегося электросопротивления. Нижний разрез позволяет оценить вертикаль-

но-зональну структуру в розподіленні електричних властивостей порід.

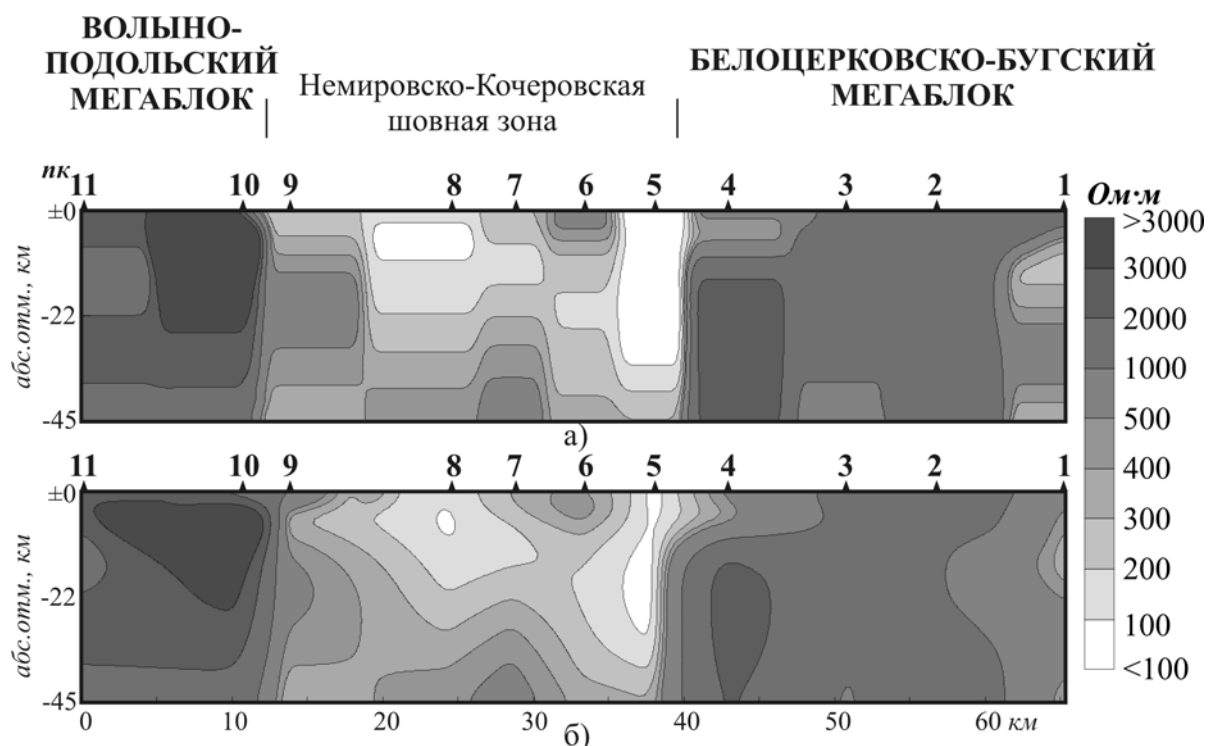


Рис. 3. Глубинный геоэлектрический разрез по профилю «Фастовский»: а) регулярная сетка рассчитана интерполятором Nearest Neighbor; б) регулярная сетка рассчитана интерполятором Natural Neighbor

В программную оболочку включен алгоритм одномерной инверсии магнитотеллурических данных [14]. Для его реализации необходимо из главного меню вызвать опцию «Inverse» и задать параметры подготовки графиков изменчивости удельного электросопротивления с глубиной или глубинно-геоэлектрического разреза по выбранному профилю. По умолчанию, вертикальная ось оцифровывается в абсолютных отметках в километровой шкале; нижняя ось размечается метровой шкалой. Минимальная абсолютная отметка установлена на уровне -45 км, но для детализации верхней части разреза ее можно увеличить до 10 км. Единицей измерения картируемого параметра по умолчанию является Ом·м, но при резкой изменчивости он может быть представлен в десятичных логарифмах от исходного значения.

Сеточная интерполяция значений удельного электросопротивления может быть реализована различными методами, описанными выше. Для геолого-геофизических условий на исследуемой площади экспериментально показано, что оптимальными способами являются метод ближайшего соседа и метод естественного соседа. С их помощью удастся расчленить разрез на электрически однородные блоки с четким позиционированием их субвертикальных границ. Локальные разломные зоны лучше выделяются при использовании метода естественного соседа (см. рис. 3).

Вышеописанная методика обработки данных МТЗ с различными вариациями управляющих параметров была использована для обработки всех временных записей, полученных в полевых сезонах 2006-2009 гг. Ее ядром является система PRC-MTMV, обладающая широким спектром самых современных методов углубленной обработки при односточечных и двухточечных схемах записи компонент магнитотеллурического поля. Эффективность и скорость обработки полевых данных намного повышается при использовании программной оболочки MT-LEMI-GRAPH, обеспечивающей реализацию модуля обработки в автоматизированном или ручном режимах с возможностью интерактивного участия интерпретатора на всех стадиях обработки.

Кроме чисто технологических новаций в оболочке расширены функции препроцессинга, внесены коррективы в алгоритм спектрального анализа временных рядов и оптимизирован процесс расчета векторных и скалярных амплитуд импеданса и их трансформации в кажущееся электросопротивление.

Описанная методика позволяет не только изменять уровень сходимости модельных и экспериментальных данных магнитотеллурического зондирования, но и дает геологу-интерпретатору мощный инструмент для анализа геоэлектрического разреза, как по простиранию, так и на глубину.

К примеру, для геоэлектрического разреза по профилю «Фастовский» (см. рис. 3), пересекающего Немировско-Кочеровскую шовную зону [15], характерно блочное строение со слабым вертикальным изменением значений электросопротивления. В Восточном Приазовье (рис. 4) наблюдается иная картина [16].

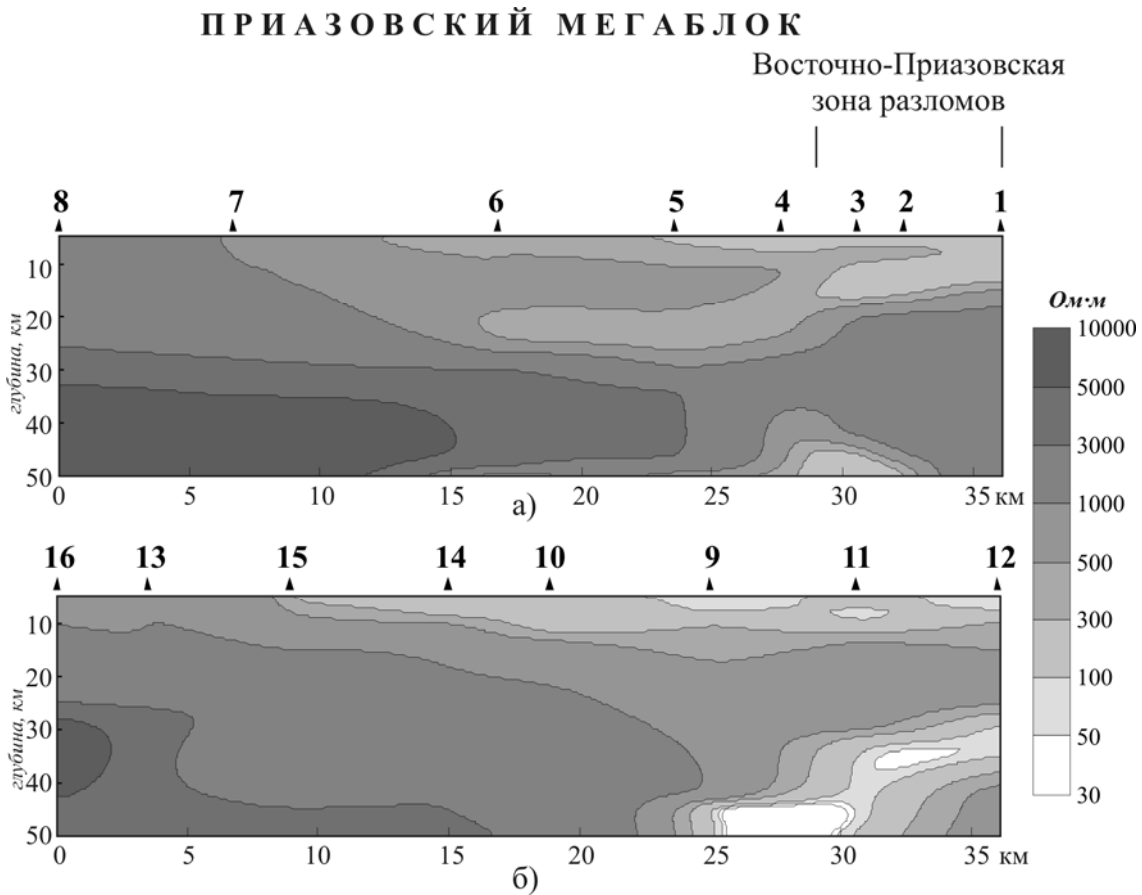


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по данным МТЗ по Восточному Приазовью: а) профиль «Тельмановский»; б) профиль «Хомутовский»

Здесь характерна вертикальная изменчивость значений электросопротивления с четко выраженным горизонтально-слоистым строением – прослеживается общая тенденция к увеличению электросопротивления с глубиной с наличием низкоомных вставок (Восточно-Приазовская зона разломов, см. рис. 4). Низкоомные вставки также разделяются на слои с разными значениями электросопротивления, отображая особенности геологического строения разломной зоны [16].

Выводы

Созданная программная оболочка, объединяющая независимые подсистемы обработки результатов магнитотеллурического зондирования, предоставляет опытному геологу-интерпретатору широкие возможности в подборе адекватной гео-

лого-геоэлектрической модели исследуемого региона на основе современных методов трансформаций параметров электромагнитного поля.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Varentsov Iv.M., Golubev N.G., Martanus E.R., Sokolova E.Yu., Nalivaiko K.V. Magnetotelluric processing system PRC-MTMV and its applications // Russian-German seminar "Actual problems in deep EM studies" (Extended Abstracts). М.: OIFZ RAN. 1997. P. 51-52.
2. Азаров Н.Я., Белявский В.В., Бердичевский М.Н. и др. Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий. – К.: Знания, 1998. – 264 с.
3. Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. О временной стабильности одноточечных оценок передаточных операторов естественного ЭМ-поля Земли // V геофиз. чтения им. В.В. Федынского: Тез. докл. – М.: ГЕОН, 2003. – С. 126-127.
4. Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. и др. Рабочая группа проекта BEAR. Методика построения передаточных операторов ЭМ-поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. – 2003. – № 2. – С. 30-61.
5. Варенцов Ив.М. Методы синхронных ЭМ // I Всесоюзная школа-семинар по ЭМ-зондированиям Земли: сб. лекций. – М.: ОИФЗ РАН, 2003. – С. 116-123.
6. Варенцов Ив.М. Массивы синхронных ЭМ-зондирований: методы построения и анализа // Электромагнитные исследования земных недр. – М.: Научный мир, 2005. – С. 143-156.
7. Eggers D.E. An eigenstate formulation the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. – 1982. - № 47. – P. 1204-1214.
8. Mackie R.L., Smith J.T. and Madden T.R. Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. – 1994. – 29. – P. 923-935.
9. Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического

- зондирования. – М.: Недра, 1985. – 133 с.
10. Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis // *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Elsevier. - 2007. – P. 263-277.
 11. Варенцов Ив.М. Рабочая группа EMTESZ-Pomerania. Массив синхронных ЭМ-зондирований EMTESZ-POMERANIA: система наблюдения и первые результаты // *I Всесоюзная школа-семинар по ЭМ-зондированию Земли: Нез. докл.* – М.: МАКС Пресс, 2003. – С. 40.
 12. Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю. Рабочая группа проекта BEAR. Диагностика и подавление авроральных искажений передаточных операторов ЭМ-поля в эксперименте BEAR // *Физика Земли.* – 2003. – № 4. – 28 с.
 13. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. – М.: Мир, 1997. – 571 с.
 14. Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Шеремет Е.М. и др. Геолого-геоэлектрическая модель Орехово-Павлоградской шовной зоны Украинского щита. – Киев: Наукова думка, 2005. – 190 с.
 15. Анциферов А.В., Шеремет Е.М., Есипчук К.Е. и др. Геолого-геофизическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита. – Донецк: Вебер, 2009. – 253 с.
 16. Шеремет Е.М., Кривдик С.Г., Пигулевский П.И. и др. Субщелочной докембрийский магматизм и тектоно-геофизические особенности Восточного Приазовья Украинского щита. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 289 с.