

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ УКРАИНСКОГО ЩИТА

д.т.н Анциферов А.В., инж. Сухой В.В., д.г.-м.н. Шеремет Е.М.,  
инж. Николаев И.Ю. (УкрНИМИ НАН Украины)

*Розглядаються питання оброблення і накопичення даних електророзвідки. Для аналізу погодженості різних етапів оброблення даних геофізичних досліджень східної частини Українського щита вперше застосована тривимірна комп'ютерна візуалізація. В основу побудови квазітривимірних геоелектричних моделей закладено результати профільних 1D і 2D моделей, отриманих у результаті оброблення польових даних методу магнітотелуричного зондування (МТЗ).*

## USAGE OF ELECTRICAL EXPLORATION DATA TO STUDY EASTERN PART OF THE UKRAINIAN SHIELD

Anziferov A.V., Suhol V.V., Sheremet E.M., Nikolaev I. U.

*The problems of processing and accumulation of electrical exploration data are considered. For the first time a 3D computer visualization is employed for the analysis of conformity of different data processing steps of geophysical research into the Eastern part of the Ukrainian shield. Resulting profile 1D and 2D models obtained as a result of MTS field data processing are in the bases of generation of quasi-3D geoelectrical models.*

### Введение

Современные методы геофизических исследований, включающие в себя процессы накопления, хранения и анализа большого количества данных, должны быть обеспечены средствами компьютерной визуализации данных в виде двумерных и трехмерных образов. В настоящее время имеется ряд универсальных программных сред, позволяющих реализовать все стороны этого процесса. Ниже рассматривается опыт применения этих сред для данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

В результате обработки экспериментальных данных программами для 1D и 2D инверсии, вся накопленная информация находится в разных файлах различного формата. Наша цель - максимально использовать возможности универсальных программных сред для обработки и накопления геофизической информации. Эти программные среды усилиями известных фирм-разработчиков постоянно развиваются и поэтому никогда морально не устаревают.

База геофизических данных, в нашем понимании, должна являться гибкой системой, которая использует любую подходящую программную среду для нужд своего развития и пополнения, а если необходимо, то и выполнения нового витка обработки и интерпретации.

## Обработка и накопление данных МТЗ

### Последовательность этапов обработки данных

Построение геоэлектрических моделей на основе данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ) многозвенный процесс, состоящий из накопления и обработки больших потоков магнитотеллурической информации. Можно выделить следующие этапы в этом процессе:

- 1) регистрация аппаратурой непосредственных измерений МТЗ процесса на исследуемом участке;
- 2) спектральная обработка измеренных временных рядов - вычисление корреляционных и автокорреляционных функций для электрических и магнитных каналов;
- 3) вычисление импеданса и его «трансформант» в зависимости от частоты, характеризующих различные параметры исследуемого объекта;
- 4) построение одномерных (1D) моделей в результате формальной инверсии частотной зависимости электрических характеристик в ряд зависимости удельного электрического сопротивления разреза от «эффективной» глубины;
- 5) построение графических образов трансформант импеданса и результатов одномерной инверсии, в виде разрезов вдоль профилей исследуемого участка, и в виде карт распределения параметров на заданной глубине участка;
- 6) формирование стартовых двумерных моделей и, на их базе, осуществление расчета двумерных моделей путем проведения 2D инверсии на основе специализированных программ;
- 7) анализ всей совокупности частотных зависимостей трансформант для одномерных и двумерных моделей.

От качества обработки информации на каждом из перечисленных этапов зависит достоверность построения двух и трехмерных геоэлектрических моделей участка. Конечно, при построении моделей обязательно должна использоваться дополнительная, так называемая, априорная информация, например, данные скважинного каротажа или других методов зондирования; структурного и литологического анализа геологической обстановки участка.

Остановимся подробнее на том, что в нашем случае служит средой программирования и предварительной обработки данных МТЗ. За основу взят фирменный пакет для научных и инженерных расчетов - Mathcad, version 1.0a, среда которого позволяет организовывать циклические вычисления, выполнение расчетов по условию, и программные зоны многократного выполнения расчетов однотипных данных, не уступая по этим показателям программированию на любом языке высокого уровня. Особенно важным достоинством среды Mathcad служит наглядность процесса создания алгоритма расчета, позволяющая контролировать каждый шаг вычислений.

В среде Mathcad нами разработан программный конвейер, позволяющий известным образом автоматизировать процесс предварительной

машинной обработки данных МТЗ. Перечислим эти этапы обработки.

Алгоритм обработки МТЗ данных [1-3] состоит из ряда как традиционных, так и оригинальных этапов и реализован в программе [2], разработанной для среды Mathcad [4]. В программе использован метод Уэлча [5] статистического усреднения по частично перекрывающимся выборкам для вычисления спектральных плотностей. Программа выполняет:

- ввод 4-х временных рядов (двух электрических  $E_x$ ,  $E_y$  и двух магнитных  $H_x$ ,  $H_y$ ) реализации МТ-процесса с первичных записей аппаратуры МТЗ;
- разбиение каждой реализации на совокупность наполовину перекрывающихся выборок одинаковой длины, при этом длина реализации определяется конкретными частотными диапазонами;
- многоэтапную фильтрацию МТ-процесса в пределах каждой выборки путем центрирования процесса и низкочастотной фильтрации (с вычитанием кубического полинома третьей степени, подбираемого методом наименьших квадратов), повторного центрирования и заключительной фильтрации с помощью окна Натолла [5] для ограничения влияния конечного интервала выборки;
- вычисление по отфильтрованной выборке коэффициентов ряда Фурье с помощью встроенных в Mathcad функций; оценка соответствующих авто- и взаимных спектров;
- статистическое усреднение авто- и взаимных спектров путем вычисления среднего арифметического, с контролем стационарности МТ процесса по близости итоговых спектров при разной организации выборок;
- высокочастотную фильтрацию («выкусывание») в спектральных оценках отдельных участков, соответствующих узким линиям техногенных помех, (например, гармоник кратных 50 Гц), с последующей линейной интерполяцией на интервалах выкусывания с берегов выкусывания;
- вычисление обычной, частной и множественной когерентностей между соответствующими электрическими и магнитными каналами (например,  $E_x$ - $H_y$ ), характеризующих качество линейных связей, выражаемых матрицей импеданса  $Z$ ;
- вычисление компонент импеданса  $Z$  для двух альтернативных статистических оценок: импедансной (1) и адмитансной (2), имеющих разную чувствительность к помехам в электрических и магнитных каналах;
- частотное сглаживания компонент тензора  $Z$  с помощью встроенных в Mathcad функций `supsmooth` и `ksmooth`, использующих адаптивный алгоритм сглаживания с Гауссовым ядром;
- фазовую коррекцию амплитуд главных компонент тензора  $Z$  на основе известной формулы Вайдельта [6, 7], устанавливающей приближенную связь между фазой и амплитудой импеданса;
- стыковку (с весовым осреднением) значений модулей и фаз компонент импеданса в среднечастотном диапазоне, с их перекрывающимися значениями в низкочастотном и высокочастотном диапазонах, кото-

рая необходима для обеспечения непрерывности импеданса по частоте в результирующем общем диапазоне частот;

- сглаживающую проекцию полученных оценок импеданса на итоговую сетку, которая имеет частоты, изменяющиеся в геометрической прогрессии;

- каталогизацию итоговых частотных зависимостей полного тензора импеданса как основного объекта дальнейшего анализа и инверсии материалов МТЗ при построении геоэлектрических моделей.

Рассмотрим ключевое звено представленной схемы обработки - фазовую коррекцию амплитудных компонент импеданса, которая повышает надежность построений импедансных кривых.

### Достоверность определения компонент импеданса

По предлагаемой схеме обработки, достоверность построения кривых магнитотеллурического зондирования контролируется величиной когерентности спектров электрических и магнитных каналов. В общем случае, рассматриваются как множественные ( $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{yx}$ ), так и частные когерентности ( $r_{xy}$ ,  $r_{yx}$ ), которые в двумерных средах равны обычной когерентности ( $c_{xy}$ ,  $c_{yx}$ ), если измерительные линии электрических и магнитных каналов соответствуют осям неоднородностей [8]. Значения когерентностей характеризуют качество линейной связи между электрическими и магнитными каналами и могут быть высокими как для магнитотеллурического сигнала, так и для доминирующих помех электромагнитной природы, характеризующихся устойчивыми линейными связями, отличными от импеданса плоской волны.

Строго говоря, использовать аппарат спектрального анализа для обработки случайного процесса можно, если он отвечает гипотезе эргодичности и стационарности. Опыт работы по обработке временных рядов МТ процесса свидетельствует об относительной стабильности определения матрицы импеданса, хотя естественное электромагнитное поле Земли далеко не всегда можно представить «стационарным белым шумом». Высокие значения когерентности между электрическими и магнитными каналами являются необходимым условием для получения несмещенных оценок импедансов при относительно невысоком уровне коррелированных шумов в измерительных каналах.

Различные процедуры осреднения позволяют ослабить влияние «помехи» в измерительных каналах и получить несмещенные оценки импеданса [8].

В трехканальной схеме определения импеданса, через взаимные и автоспектры МТ процесса [8, 9], обычно рассматриваются две взаимодополняющие оценки:

Импедансная  $ZI$ :

$$ZI = (S_{HH})^{-1} S_{EH}, \quad (1)$$

и адмитансная  $ZA$ :

$$ZA = (S_{EH})^{-1} S_{EE}, \quad (2)$$

здесь  $S_{EE}$ ,  $S_{HH}$  и  $S_{EH}$  - матрицы, составленные из соответствующих авто- и взаимных спектров горизонтальных компонент магнитного  $H$  и электрического  $E$  полей.

Надежность определения компонент тензора импеданса контролируется невязками между наблюдаемыми взаимными спектрами  $S_{exhy}(V_j)$ ,  $S_{eyhx}(V_j)$ ,  $S_{exhx}(V_j)$ ,  $S_{eyhy}(V_j)$ , и вычисленными по магнитным каналам  $S_{HH}$  с помощью матрицы  $Z$ :

$$\begin{aligned} \delta S_{exhy} &= S_{exhy} - (Z_{xx_j} \cdot S_{hxhy} + Z_{xy_j} \cdot S_{hyhy}), & \delta S_{exhx} &= S_{exhx} - (Z_{xx_j} \cdot S_{hxhx} + Z_{xy_j} \cdot S_{hyhx}), \\ \delta S_{eyhx} &= S_{eyhx} - (Z_{yy_j} \cdot S_{hyhx} + Z_{yx_j} \cdot S_{hxhx}), & \delta S_{eyhy} &= S_{eyhy} - (Z_{yy_j} \cdot S_{hyhy} + Z_{yx_j} \cdot S_{hxhy}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ,  $Z_{yy}$  - зависящие от частоты соответствующие компоненты матрицы импеданса. Для сокращения записи в (3) опущена функциональная зависимость от частоты  $V_j$ , оставлен лишь индекс  $j$ , нумерующий частоты в пределах рассматриваемого диапазона.

Невязки (3), связанные со значениями множественных когерентностей измерительных каналов, служат основой построения доверительных интервалов при синтезе импедансных и адмитансных оценок.

На низких ( $< 5\text{Гц}$ ) и высоких ( $> 400\text{Гц}$ ) частотах зондирования согласие между этими оценками существенно ухудшается из-за влияния шумов-помех. Для этих участков частот применяется процедура фазовой коррекции, повышающая достоверность амплитудных оценок импеданса на этих частотах.

#### Фазовая коррекция амплитудных оценок импеданса

Довольно часто, в наиболее интересных, с геологической точки зрения, участках профилей МТЗ из-за влияния промышленных помех когерентность между взаимными парами регистрируемых каналов сильно уменьшается, что ведет к потере достоверности оценки импеданса. Однако основная часть кривой зондирования все же обладает требуемым уровнем когерентности и дает несмещенные оценки импеданса. Для коррекции участков кривых (интервалов периодов) с низкой когерентностью можно воспользоваться приближенным дисперсионным соотношением между амплитудой и фазой импеданса [6, 7]:

$$\varphi(\ln(\sqrt{T})) \approx \frac{\pi}{4} \frac{d(\ln(|Z(\sqrt{T})|))}{d(\ln(\sqrt{T}))}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  - фаза,  $|Z|$  - модуль соответствующей компоненты тензора импеданса,

$T$  – период.

Это соотношение служит для восстановления «некондиционных» участков амплитудных кривых по более достоверным значениям фазовых кривых.

После интегрирования формула (4) приобретает вид

$$\left| Z(\sqrt{T}) \right| = \left| Z(\sqrt{T_v}) \right| \cdot \exp \left\{ -\frac{4}{\pi} \int_{\ln(\sqrt{T_v})}^{\ln(\sqrt{T})} \varphi(\ln(\sqrt{T})) d(\ln(\sqrt{T})) \right\}. \quad (5)$$

Процедура фазовой коррекции сводится к применению формулы (5) для рассматриваемых интервалов периодов с последующим пополнением рассчитанными значениями амплитудных кривых МТЗ, а инструментом ее настройки является выбор периода Вайдельта -  $T_v$  на участках амплитудных кривых МТЗ, где когерентность высока, например, порядка 0.9 и, соответственно оценка модуля импеданса не смещена.

Расчеты выполняются для серии  $T_v$ . Процедура коррекции, в принципе, может выполняться для всех компонент тензора импеданса, но нами используется только для главных импедансов: продольного и поперечного. Перед процедурой фазовой коррекции осуществляется сшивка участков импедансных фазовых кривых, получаемых среднеарифметическим осреднением импедансной и админтанснй оценок (область высокой когерентности) с участками кривых, соответствующих низкой когерентности, полученных по импедансной оценке. Это делается потому, что импедансная оценка при вычислении фазы импеданса на низких частотах, на наш взгляд, является более достоверной. Процедура сшивки выполняется при помощи линейного полинома с соответствующими весовыми коэффициентами. Для каждой компоненты тензора используем свои весовые коэффициенты, подбираемые в процессе работы. В результате получаем непрерывные фазовые кривые компонент тензора импеданса, которые затем используются при преобразовании (5).

Сам факт выполнения дисперсионных соотношений для тензора импеданса строго доказан только для одномерных и большей части двумерных сред. Для трехмерных сред приводятся соображения в пользу явного нарушения этих соотношений на приповерхностных контактах хорошо проводящих сред с блоками высокого сопротивления. Соответственно, необходимо обоснование применимости нашего подхода к использованию дисперсионных соотношений для коррекции модуля импеданса.

Во-первых, результаты фазовой коррекции используются для достаточно узких интервалов частот. Высокие частоты (> 400Гц) МТЗ, в большинстве случаев, соответствуют верхним частям геологических разрезов, имеющих мощность в первые сотни метров, и соответствующих рыхлым пространственно однородным породам - геологическим структурам (отложениям), для которых почти очевидна локальная применимость 1D моделей и, соответственно, применимость дисперсионных соотношений. Для

частот МТЗ порядка 1Гц и ниже сложные, локально трехмерные, пространственные геологические структуры вырождаются в квазидвумерные региональные структуры, для которых также очевидна применимость дисперсионных соотношений.

Во-вторых, оценки значений фазы импеданса обычно испытывают меньшее влияние некоррелированных шумов в измерительных каналах по сравнению с амплитудными оценками. Для двухканальной схемы определения импеданса это утверждение очевидно. Если помехи в магнитных каналах не коррелированы с электрическими, то в числителе формулы (1) член, содержащий корреляционную функцию с помехой, пропадает в результате статистического усреднения, а в знаменателе (1) состоит из суммы двух членов: спектральной плотности истинной автокорреляционной функции, и спектральной плотности автокорреляционной функции помехи, которые являются вещественными величинами. Таким образом, в двухканальной схеме фаза импеданса не испытывает влияния некоррелированных помех.

В третьих, предлагаемая процедура используется нами для формирования исходных данных в задаче построения 2D геоэлектрических моделей. Анализ данных по уже построенным моделям показал, что для рассматриваемых типов разрезов расхождения между исходными кривыми кажущегося сопротивления и полученными из модельных фаз не превышают первых процентов. Это говорит о взаимной согласованности всей использованной схемы построения 2D моделей.

**Оценка погрешности определения основных компонент тензора импеданса в трехмерных средах**

Рассмотрим выражение для импедансной оценки компоненты  $Z_{yx}$ :

$$ZI_{yx} = \frac{S_{EyHx}}{S_{HxHx}} \left( 1 - \frac{S_{EyHy} S_{HyHx}}{S_{EyHx} S_{HyHy}} \right) \left( 1 - \frac{S_{HxHy} S_{HyHx}}{S_{HxHx} S_{HyHy}} \right)^{-1} \quad (6)$$

Фаза данной комплексной величины равна фазе выражения

$$S_{EyHx} \left( 1 - \frac{S_{EyHy} S_{HyHx}}{S_{EyHx} S_{HyHy}} \right). \quad (7)$$

Соответственно, из (7) получаем:

$$\arg(ZI_{yx}) = \varphi_{yx} + \Delta\varphi_1, \quad (8)$$

где  $\varphi_{yx} = \arg(S_{EyHx})$  - фаза скалярного импеданса при отсутствии шума, а

добавка, равная  $\Delta\varphi_1 = \arg\left( 1 - \frac{S_{EyHy} S_{HyHx}}{S_{EyHx} S_{HyHy}} \right)$ .

Основной вклад в значение фазы (8) дает величина  $\varphi_{yx}$ . Добавка  $\Delta\varphi$  будет отлична от нуля в двумерной среде, если измерительные линии соответствуют осям структур, или также отлична от нуля трехмерных геоелектрических средах. Обычно модуль отношения

$$\left| \frac{S_{E_y H_y} S_{H_y H_x}}{S_{E_y H_x} S_{H_y H_y}} \right| \ll 1, \text{ а по}$$

этому и добавка  $\Delta\varphi$  является малой величиной. Таким образом, некоррелированные шумы в электрических каналах не оказывают существенного влияния на определение фазы  $\arg(ZI_{yx})$ .

Влияние шумов по магнитному каналу  $H_y$  входит в знаменатель выражения, определяющего добавку  $\Delta\varphi$  к основному значению  $\varphi_{yx}$ , и поэтому, при росте величины шума в канале, происходит уменьшение величины этой поправки к значению фазы  $\varphi_{yx}$ . Допустим, что шум по магнитному полю  $H_y$  стал на порядок больше чем полезный сигнал. Тогда значение модуля  $ZI_{yx}$  незначительно уменьшится, а величина фазы устремится к  $\varphi_{yx}$ . В отличие от шумов в канале  $H_y$ , шумы в канале  $H_x$  будут оказывать существенное влияние на значение модуля  $ZI_{yx}$ , а на фазу нет, если они не коррелированы с остальными каналами.

Таким образом, влияние не коррелированных шумов в магнитных каналах приводит к потере информации о влиянии трехмерных включений в структуре геоэлектрического разреза на величину фазы импеданса, сохраняя при этом информацию о двумерных неоднородностях.

Рассмотрим влияние шумов в адмитансной оценке продольной компоненты матрицы импеданса, которая имеет выражение

$$ZA_{yx} = \frac{S_{E_y E_y}}{S_{H_x E_y}} \left( 1 - \frac{S_{E_y E_x} S_{H_y E_y}}{S_{H_y E_x} S_{E_y E_y}} \right) \left( 1 - \frac{S_{H_y E_x} S_{H_y E_y}}{S_{H_y E_x} S_{H_x E_y}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Для фазы этой компоненты имеем  $\arg(ZA_{yx}) = \varphi_{yx} + \Delta\varphi_a$ , где

$$\Delta\varphi_a = \arg \left( \left( 1 - \frac{S_{E_y E_x} S_{H_y E_y}}{S_{H_y E_x} S_{E_y E_y}} \right) \left( 1 - \frac{S_{H_y E_x} S_{H_y E_y}}{S_{H_y E_x} S_{H_x E_y}} \right)^{-1} \right) \quad (10)$$

Видно, что некоррелированные шумы магнитных каналов на определение модуля  $ZA_{yx}$  существенного влияния не оказывают.

Вклад некоррелированных шумов по электрическому каналу  $E_y$  находится в числителе выражения для модуля (9). Аналогично анализу, приведенному выше для магнитных полей можно заключить, что некоррелированные шумы по электрическим каналам существенно влияют на значение модуля  $ZA_{yx}$ , в то время как значение фазы стремится к значению  $\varphi_{yx}$ .

Аналогичные выводы о влиянии шумов в измерительных каналах можно сделать и для  $Z_{xy}$  второй основной компоненты матрицы импеданса.



## Формальная 1D инверсия

Используя метод контролируемых итераций, в рамках 1D градиентных моделей, нами автоматизирован процесс пересчета кажущихся сопротивлений, зависящих от частоты или периода зондирования, в сопротивлении, зависящие от глубины [10]. Этот пересчет называется формальной 1D инверсией [2].

По скорректированным кривым  $\rho^{\text{II}}(T)$  – продольного кажущегося сопротивления проводится решение обратной задачи в классе кусочно-непрерывных сред [2], по аналогии с подходом Бердичевского и Дмитриева [7].

Основные действия, выполняемые при этом:

1) ввод данных о главных значениях матрицы импеданса для каждой точки профиля и интерполяция этих данных на соответствующую рабочую геометрическую шкалу частот;

2) выполнение сглаживания кубическим сплайном в двойном логарифмическом масштабе для модуля сопротивления и в логарифмическом масштабе частоты для фазы импеданса;

3) по трансформанте Молочного - Ле Вьета или Ниблетта [7, 10] осуществляется построение стартовой модели на геометрической шкале глубин, соответствующей выбранной частотной сетки. Расстояние между узлами этой шкалы и есть толщины пластов слоистого разреза, величины сопротивлений которых определяются рассматриваемым алгоритмом. Если трансформация частот в шкалу глубины не дает монотонного возрастания «эффективной» глубины зондирования с увеличением периода, то такие участки кривых принудительно упорядочиваются по возрастанию глубины;

4) организация контролируемого итерационного поиска распределения удельного сопротивления с глубиной  $\rho(H)$ . Для этого на каждом шаге итераций по формуле Ваньяна-Липской [7] решается прямая задача определения модельных  $\rho^m_k$  кажущихся сопротивлений. Отклонение значений текущего  $\rho^m_k$  от полевых данных  $\rho_k$ , сглаженных согласно пункта 2, корректирует с помощью задаваемых коэффициентов значения текущих модельных  $\rho^m(H)$  в каждом из слоев горизонтально-слоистом разрезе (итерация инверсии).

5) после каждого шага итераций выполняется сплайн-сглаживание модельных значений в двойном логарифмическом масштабе. В ходе выполнения итераций процесс сглаживания  $\rho^m_k$  можно контролировать, уменьшая параметр, задающий степень гладкости сплайн-интерполяции, что, на наш взгляд, эквивалентно процедуре уменьшения параметра регуляризации в традиционных устойчивых методах решения обратных одномерных задач путем минимизации соответствующего функционала невязки и использования добавки - сглаживающего стабилизатора [7]. Для повышения устойчивости алгоритма расчета в определении сопротивлений  $\rho^m_k$  пластов в ходе итерационного процесса вводятся ограничения на диа-

пазон возможного изменения определяемых значений  $\rho_1$  (аналог робастной метрики функционала). В результате расчета определяется распределение удельного сопротивления с глубиной для каждого пикета профиля;

б) при формировании исходных данных для выполнения расчетов 2D-инверсии осуществляется выбор подходящей шкалы интервалов величин  $\rho(H)$ . Разным интервалам этой шкалы присваиваются разные буквенно-цифровые символы-коды. В сформированной таким образом итоговой матрице 1D-инверсии, численные значения  $\rho(H)$  для каждого узла матрицы заменяются на соответствующий буквенный символ-код. В дальнейшем эта матрица используется в формировании стартовых данных к программе 2D-инверсии. Кроме того, для расчета бимодальных моделей формируются данные кажущегося сопротивления в формате ввода к программы для 2D-инверсии.

### Построение 2D моделей

Для построения двумерных моделей применяется метод устойчивой робастной инверсии [11, 12], которая реализована в программе INV2D группы EMSOFT (Варенцов И. М., Голубев Н. Г. Руководство пользователя, редакция 20.12.96) для моделей с кусочно-постоянным распределением электропроводности, т.е. с фиксированной геометрией блоков и слоев геологического разреза. Обратная задача геоэлектрики решается с использованием совместной инверсии скорректированных продольных  $\rho^{\parallel}(T)$  и поперечных  $\rho^{\perp}(T)$  кажущихся сопротивлений для  $H$  и  $E$  поляризации электромагнитного поля - бимодальные модели. Модель возбуждается полем плоской вертикально падающей электромагнитной волны.

Априорными данными для программы INV2D являются начальная модель, состоящая из блоков с фиксированной геометрией и различными удельными электрическими сопротивлениями, составленная по комплексу данных МТЗ. Подбор вектора  $\rho$  сопротивлений осуществляется с учетом оценок погрешностей, инвертируемых данных и априорной модели.

Нами разработаны интерфейсные программы для автоматизации перехода к формату ввода данным для программы 2D моделирования. Разработаны также программы, преобразующие результирующие расчетные данные 2D моделирования листинга программы INV2D в формат ввода к программным средам Surfer и RockWork2002, для получения двумерной и трехмерной визуализации расчетов площадных исследований методом МТЗ.

**Трансформация данных геофизических исследований восточной части Украинского щита для их обработки разными программами**

Для визуализации и анализа большого объема геофизических данных приходится решать типичную задачу трансформации накопленных данных, хранящихся в большом числе файлов разного формата, в данные, помещаемые в большое количество других файлов, но уже другого формата. При этом попутно выполняются простые вычислительные процедуры формирования новых данных.

Так, например, для построения карт разрезом средствами программы Surfier Version 8.00 корпорации Golden Software необходимо обеспечить соответствующую трансформацию расчетных данных в формат ввода к этой программе.

Подключение мощной программы RockWorks2002 корпорации RockWare для построения разнообразного набора двумерных и трехмерных образов в задаче обработки геофизической информации потребовало обеспечить трансформацию наших данных, в данные, имеющие формат ввода к этой программе.

Набор данных по исследуемому участку непрерывно уточняется, пополняется и анализируется, поэтому описанная трансформация данных не однократно выполняемая работа, а своего рода инструмент интерфейса, предназначенный для обслуживания пополняемых данных, позволяющий оперативно преобразовывать исходные данные для их использования соответствующими наборами обрабатывающих универсальных программных сред.

Для обеспечения возможности работы с нашей базой данных в рамках программы RockWorks2002, все ранее накопленные данные исследований по восточной части Украинского щита были переведены в формат исходных данных к этой программе. Сюда вошли: координаты точек МТЗ, данные по величине кажущегося сопротивления, данные 1D и 2D инверсии, данные по тектоническим нарушениям региона.

В результате создано новое полное представление данных геофизических исследований по восточной части Украинского щита, обеспечивающее работу программы RockWorks2002 с целью построения двух- и трехмерных образов, наглядно представляющих распределение соответствующих параметров и обеспечивающих надежный визуальный контроль накопленных данных.

Если учесть, что программа RockWorks2002 предоставляет своим пользователям интерфейс с таблицами Excel и возможность экспорта данных в другие известные программы, то эту программу и формат хранения её данных можно рассматривать, как мощное самостоятельное средство накопления и хранения геофизических данных – базу геофизических данных.

### **Квазитрехмерные геофизические модели**

#### **Использование квазитрехмерных моделей на этапах обработки МТЗ**

Для иллюстрации предлагаемого подхода к накоплению базы геофизических данных, построен ряд квазитрехмерных моделей, отражающих три этапа обработки ранее полученных данных МТЗ (данные из фонда ГКГУ «Укргеология», Центральной геофизической экспедиции, 1986г.).

Трехмерная визуализация кажущихся сопротивлений, продольного удельного сопротивления, в компактном наглядном виде представляет достоверность экспериментального материала, качество его предваритель-

ной спектральной обработки.

Трехмерная визуализация результата формальной 1D инверсии кажущегося продольного удельного сопротивления в компактном наглядном виде представляет пространственное распределение сопротивления и высокую согласованность полученных профильных локальных 1D моделей в рамках общей квазитрехмерной картины.

Трехмерная визуализация результатов 2D инверсии бимодальных моделей, в компактном наглядном виде представляет пространственное распределение двумерных разрезов на фоне общей квазитрехмерной модели.

Можно рассмотреть множество вспомогательных двумерных сечений трехмерной модели вертикальными и горизонтальными плоскостями, позволяющих увидеть «внутренность» квазитрехмерных моделей.

Отмечается хорошая взаимная согласованность всех трех моделей в отношении расположения зон, имеющих повышенные и пониженные значения величин сопротивления. Из представленного рисунка (рис. 1) видно, что переход от распределения кажущегося сопротивления через построение 1D модели к построению 2D модели сопровождается уточнением положения высокоомных коренных пород в восточной части Украинского щита и сужением зон малых сопротивлений, соответствующих разломным зонам (рис. 1а).

#### **Геологический анализ квазитрехмерных моделей**

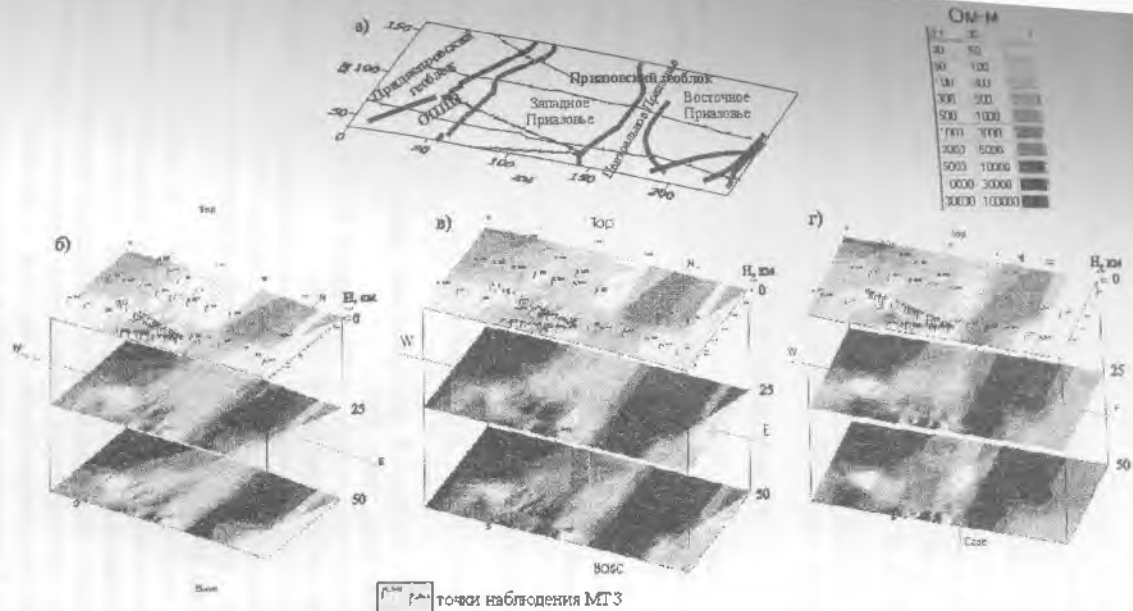
Применение результатов обработки данных МТЗ (1D и 2D-инверсии) для геологических образований кристаллического фундамента Восточной части Украинского щита выразилось в построении региональных геоэлектрических разрезов 1D и 2D; карт погоризонтного распределения электросопротивлений до глубины 50 км; формировании «этажерок», которые отображают расположение погоризонтных карт значений 1D и 2D электросопротивлений друг над другом через заданные интервалы глубин.

Применение программы RockWorks2002 позволило отобразить все накопленные результаты геофизических исследований по этому участку в виде объемных моделей (рис. 1б, в, г). Как видно из рисунков, высокоомные зоны характеризуют архейские кристаллические образования Приднепровского геоблока и Восточно-Приазовского блока, метаморфизованных в гранулитовые фации. Низкие значения сопротивления присущи кристаллическим породам Орехово-Павлоградской шовной зоны и примыкающим к ней породам Западного Приазовья.

С точки зрения поисков полезных ископаемых доказано [1, 13, 14], что низкоомные структуры перспективны на обнаружение месторождений золота, железа и других металлов.

#### **Заключение**

В работе описана схема обработки и накопления данных методов электроразведки МТЗ, формирования базы геофизических данных, имеющей внутренние средства визуализации и контроля в виде построения



**Рис 1.** Горизонтальные срезы распределения величины удельного сопротивления для квазитрехмерной геоэлектрической модели восточной части Украинского щита: а) тектоническая схема восточной части Украинского щита, относящаяся к горизонту "0 км" на рис.а, б, в; б) модель по результатам первичной обработки данных МТЗ (распределение значений кажущегося сопротивления); в) модель по результатам 1D инверсии данных МТЗ; г) модель по результатам 2D инверсии данных МТЗ. (Наиболее темные участки на моделях - высокоомные области Приднепровского геоблока и Восточного Приазовья; светлые - низкоомные области, характеризующие разломные зоны - ОПШЗ, Центральное Приазовье, восточную часть Восточного Приазовья).

квазитрехмерных геофизических моделей. Такой подход предлагается для визуализации большого объема как исходных геофизических данных, так и данных, представляющих определенные этапы их обработки.

Визуализация имеет, с одной стороны, ценность, как средство компактного наглядного представления геофизических данных, а с другой стороны, служит рабочим инструментом анализа и коррекции всей схемы обработки, позволяющим оперативно оценить согласованность деталей расчета с общей наглядной картиной и априорными данными.

В результате проделанной работы сформирована стартовая трехмерная модель для проведения расчетов 3D инверсии данных по восточной части Украинского щита с соответствующей обрабатывающей программой.

Метод МТЗ позволяет разделять электрически неоднородные геологические формации, определять конфигурацию шовных геологических зон.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров Н.Я., Белявский В.В., Гошовский С.В. и др. Геоэлектрические модели золото-рудных месторождений Украинского щита и Донбасса. Киев: Знание, 1999. - 160 с.
2. Белявский В.В., Бурахович Т.К., Кулик С.Н., Сухой В.В. Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. - К.: Знания, 2001. - 227 с.
3. Белявский В.В., Сухой В.В. Технология рудного аудиоманнитотеллурического зондирования // Разведка и охрана недр. - 2003. - № 2. - С. 38-47. - М.: Недра.
4. Дьяконов В. MATHCAD 2000: учебный курс - СПб: Питер, 2000. - 592 с.
5. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 584 с.
6. Weidelt P. The Inverse Problem of Geomagnetic Introduction // Zeitschrift für Geophysik. - 1972. - Band 38. - S. 257-289.
7. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально однородных сред. - М.: Недра, 1992. - 250 с.
8. Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. - М.: Недра, 1985. - 133 с.
9. Безрук И.А., Бердичевский М.Н., Ключкин В.Н., Куликов А.В. Применение теории случайных процессов к анализу магнитотеллурического поля // Прикладная геофизика. - 1964. - Вып. 39. - С.75 - 90
10. Ле Вьет Зы Хыонг, Бердичевский М.Н. Обобщение метода Молочного Секриеру для интерпретации магнитотеллурических зондирований // Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли. - 1986. - N 8. - с.100-105.
11. Еваренцов И.М. Современные тенденции в решении прямых и обратных задач трехмерной геоэлектрики. В кн.: Математическое моделирование электромагнитных полей. М., ИЗМИРАН, 1983, с.26-68.

12. Варенцов И.М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах, Физика земли 2002. № 11 с.11-31.
13. Геоэлектрическая модель Приазовского блока УЩ / Белявский В.В., Шеремет Е.М., Сетая Л.Д., Николаев Ю.И., Николаев И.Ю., Агаркова Н.Г., Мартынов Г.П. "Физико-технические проблемы горного производства" - Сборник научных трудов Института физики горных процессов НАН Украины, Донецк: ООО "Апекс". С.48-57.
14. Связь проявлений рудных полезных ископаемых с глубинным геоэлектрическим строением Орехово-Павлоградской шовной зоны Украинского щита / Шеремет Е.М., Николаев И.Ю., Федотова Л.А. "Физико-технические проблемы горного производства" - Сборник научных трудов Института физики горных процессов НАН Украины, Донецк: ООО "Апекс". С.145-150.