

В.Н. Тарасов¹, И.М. Логвинов¹, Д.А. Литвинов²

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ 3D МОДЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Представлена новая программа (TAR3D) трехмерной визуализации данных, созданная в среде MATLAB. На примере результатов двумерного моделирования данных магнитотеллурических зондирований Кировоградского рудного района показаны возможности программы. Проведено сопоставление с известными в мире подобными программами.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, магнитотеллурические зондирования, Кировоградский рудный район.

Введение. В настоящее время практически ни одна геолого-геофизическая задача не решается без использования той или иной геоинформационной технологии. Существенный прогресс в развитии программного обеспечения связан с внедрением географических информационных систем (ГИС). Последние работают с координатно-привязанными объектами и позволяют реализовывать топологическое покрытие при построении различного типа карт. Топологическое покрытие представляется в виде наложения одного на другое нескольких различных по тематике картографических объектов – пункты наблюдений и значения физического параметра в них, изолинии значений разных геолого-геофизических параметров и др.

При построении комплексной геолого-геофизической модели необходимо совмещать карты с различными данными. Решение всех вопросов и дороговизна подобных ГИС, разработанных в различных организациях, привело сотрудников отдела тектоносферы Института геофизики (ИГФ) НАН Украины к созданию собственной автоматизированной геоинформационной системы (ГИС ТАРИГ). ГИС ТАРИГ широко использовалась на разных этапах выполнения настоящей работы и обычно применяется не только к геоэлектрическим, но и к другим геофизическим данным [3, 5–9]. Процесс использования ГИС ТАРИГ иллюстрирует блок-схема (рис. 1).

В основу построения ГИС ТАРИГ положены следующие принципиальные требования:

- а) использование в качестве входной информации растровых и векторных изображений карт, результатов наблюдений геофизических полей и фактографических данных разного типа, привязанных к пространственным объектам;
- б) совместная обработка разных начальных материалов независимо от технологии их введения;
- в) интеграция пространственных и фактографических данных в одной геоинформационной оболочке;

г) объединение и интеграция данных, полученных разными способами, и их отображение в различных картографических проекциях.

Единой универсальной ГИС-структуры не существует, поэтому чаще всего она определяется заказчиками или в зависимости от поставленной цели формируется в свободной форме непосредственно исполнителями. К настоящему времени в отделе тектоносферы ИГФ НАН Украины созданы основные элементы атрибутивных данных ГИС-структуры (рис. 1), такие как база данных результатов наблюдений магнитотеллурического (МТ) поля, программы обработки вариаций МТ поля, программы моделирования и визуализации. Накоплено значительное количество растровых и векторных данных, которые включают в себя разнообразную картографическую и табулированную геолого-геофизическую информацию для территорий Украины и других стран.

Постановка задачи создания программы TAR3D. В последние годы в различных областях знаний стали популярными построения 3D моделей, которые обычно не выходят за рамки формальной 3D визуализации результатов одно- и двумерного моделирования. Чаще всего это связано с недостаточным и неравномерным покрытием измерениями изучаемой территории, для которой 3D-моделирование пока еще преждевременно.

Для территории Украины трехмерное моделирование в ИГФ НАН Украины выполняется в постановке решения прямой задачи более 15 лет Т.К. Бурахович и С.Н. Куликом [1, 2], а с использованием инверсии магнитовариационных данных в постановке тонкого слоя – И.М. Логвиновым, В.Н. Тарасовым и С. Ковачиковой [3, 5, 8, 9].

В работах [1, 2] и других, использующих тот же подход, реальная среда аппроксимируется нагромождением несуществующих в природе крупных прямоугольных блоков с той или иной проводимостью. Тем не менее полученные результаты



Рис. 1. Структурно-функциональная схема ГИС ТАРИГ

не следует считать отрицательными, они указывают лишь на возможность метода с позиции данного подхода. О точности построения результативных моделей речь даже не идет, поскольку используется элемент формализованного подхода. Подобрать адекватную модельную среду для трехмерных структур достаточно сложно и едва ли возможно. Любое упрощение приводит к неограниченному числу субъективных решений (неоднозначность обратной задачи). В результате модели по одному и тому же региону у разных авторов, как правило, различаются. Поэтому делать какие-либо выводы без привлечения иной геолого-геофизической информации не совсем корректно. Несмотря на значительный объем математических вычислений, результат моделирования может оказаться полезен лишь для качественных рассуждений.

Поскольку геоэлектрические методы направлены на выявление аномалий электропроводности, с этой частью задачи рассмотренный вид моделирования, по-видимому, справляется. Однако их пространственное распределение остается непонятным и до конца не изученным. Основные проблемы заключаются в том, что в подобные модели закладываются только известные аномалии проводимости и над блоками модели часто не существует экспериментальных данных. Сгущение сети наблюдений в сочетании с решением 3D обратных задач позволит в будущем несколько выправить указанные недостатки, но окончательно не разрешит проблемы.

В настоящее время средства 3D визуализации значительно опережают как измерительные, так и

вычислительные подходы в геоэлектрике, основными недостатками которых будут всегда оставаться: 1) густота сети наблюдений; 2) избыток промышленных помех и др.

Явным лидером в сфере ГИС-технологий является программный пакет ArcGIS (www.esri.com) в его различных модификациях, на долю которого приходится порядка 80 % пользователей. Вместе с тем даже обладание этим программным продуктом не означает, что поставленная цель, к примеру объемная визуализация МТ данных, может быть решена самостоятельно. Пакет ArcGIS представляет собой коммерческую программу, достаточно громоздкую и непростую в освоении. При использовании пакета ArcGIS в большинстве случаев имеет смысл привлечение к работе организаций, специализирующихся на применении и разработке конечных продуктов для данного программного обеспечения ПО. В частности, представителем фирмы "Esri" в Украине, выполняющим ГИС-работы, является компания ECOMM.

Следует отметить, что такие мощные программные пакеты, как ArcGIS, ориентированы прежде всего на работу с картографическими данными и оптимизированы скорее для географического, а не для геофизического применения. Возможности анализа, обработки и визуализации данных о строении Земли в пакете ArcGIS очень ограничены. Удобное применение пакета к геофизическим задачам требует создания достаточно громоздких и сложных дополнительных специализированных комплексов или же применения таких коммерческих дополнений, как Entervol, EVS, MVS компании C-Tech. Дополнительные

финансовые затраты и отсутствие open-source возможностей не способствуют популярности применения данного ПО в научно-исследовательских проектах.

В исследовательской работе ГИС-программы обычно выполняют вспомогательную роль. Основными требованиями, выдвигаемыми к любой программной ГИС-продукции, остаются: простота обращения, интуитивно понятный интерфейс, временные затраты, качество и точность построений.

Альтернативным выходом из сложившейся ситуации может быть применение небольших по объему программ с ограниченным и в то же время достаточным набором функций (SURFER, VOXLER, MapInfo и пр.). Большинство исследователей так и поступают.

Сходные результаты можно получать и в среде MATLAB, которая изучается практически во всех вузах и не испытывает дефицита в специалистах. Открытость программного кода значительно расширяет вид конечного продукта – минимальные затраты времени в процессе программирования, самостоятельный выбор решений, обмен решениями, хорошо разработанный справочный материал. MATLAB выступает также в качестве связующего звена между такими этапами применения ГИС-систем: моделирование, визуализация, применение статистического анализа и прочие вычисления. Различные комбинации по упомянутым программам предоставляют колоссальные возможности для геолого-геофизических исследований.

Создание программы трехмерной визуализации данных исследований должно было решить следующие задачи: выявить на площади перспективные для дальнейших исследований участки, мгновенно получить горизонтальные и вертикальные координаты характерных точек на интересующем объекте и, с учетом изложенного, более обоснованно заложить новые пункты измерений. Такая программа (и интерфейс) была создана в отделе тектоносферы ИГФ НАН Украины (TAR3D) в среде MATLAB.

Апробация программы TAR3D. Объем данных МТ-исследований в Украине уже сейчас позволяет использовать результаты 1D- и 2D-моделирования для получения наглядного представления геоэлектрических параметров в 3D пространстве. Этот прием, как уже указывалось, – формализованный и ни в коем случае не заменяет более сложный вариант собственно 3D-моделирования. Тем не менее объемная модель позволяет оперативно с различных сторон оценить полученные в результате обработки интерпретационные параметры МТ поля, а также геоэлектрическое строение района по результатам 1D- и 2D-моделирования.

Рассмотрим применение программы TAR3D на примере ее использования при построении геоэлектрической модели Кировоградского рудного района (КРР) Украинского щита.

По результатам цифровой обработки данных МТ-исследований, позволившей получить магнитотеллурические и магнитовариационные интерпретационные параметры в широком диапазоне периодов от 1 до 10 000 с, было выполнено 2D-моделирование с применением решений обратной задачи на основе алгоритма REBOCC [10]. Восемь профилей моделирования были ориентированы в меридиональном и широтном направлениях с достаточно равномерным покрытием исследуемой площади (рис. 2).

На рис. 3, а показана 3D модель КРР для изоповерхностей 10 и 40 Ом·м, полученная с помощью программы TAR3D, на рис. 3, б – в программе VOXLER (www.goldensoftware.com). В первом случае с помощью графического пользовательского интерфейса (GUI) приложения MATLAB были написаны две программы (рис. 4). Одна из программ считывает результирующие модельные данные последовательно по всем профи-

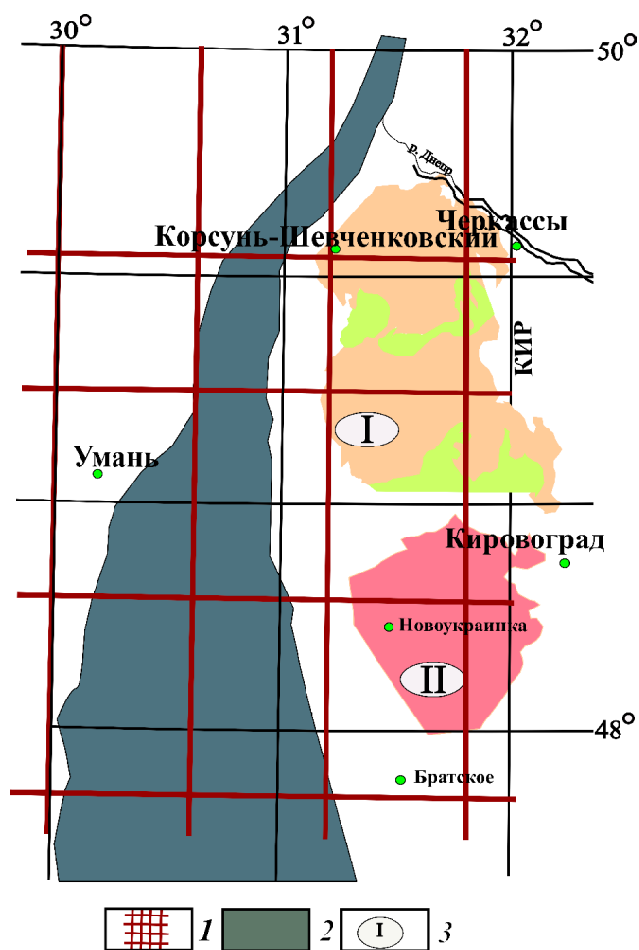


Рис. 2. Схема расположения профилей двумерного моделирования на тектонической карте [4] с упрощениями: 1 – линии профилей; 2 – Голованевская шовная зона; 3 – массивы гранитоидов (I – Корсунь-Новомиргородский плутон, II – Новоукраинский массив)

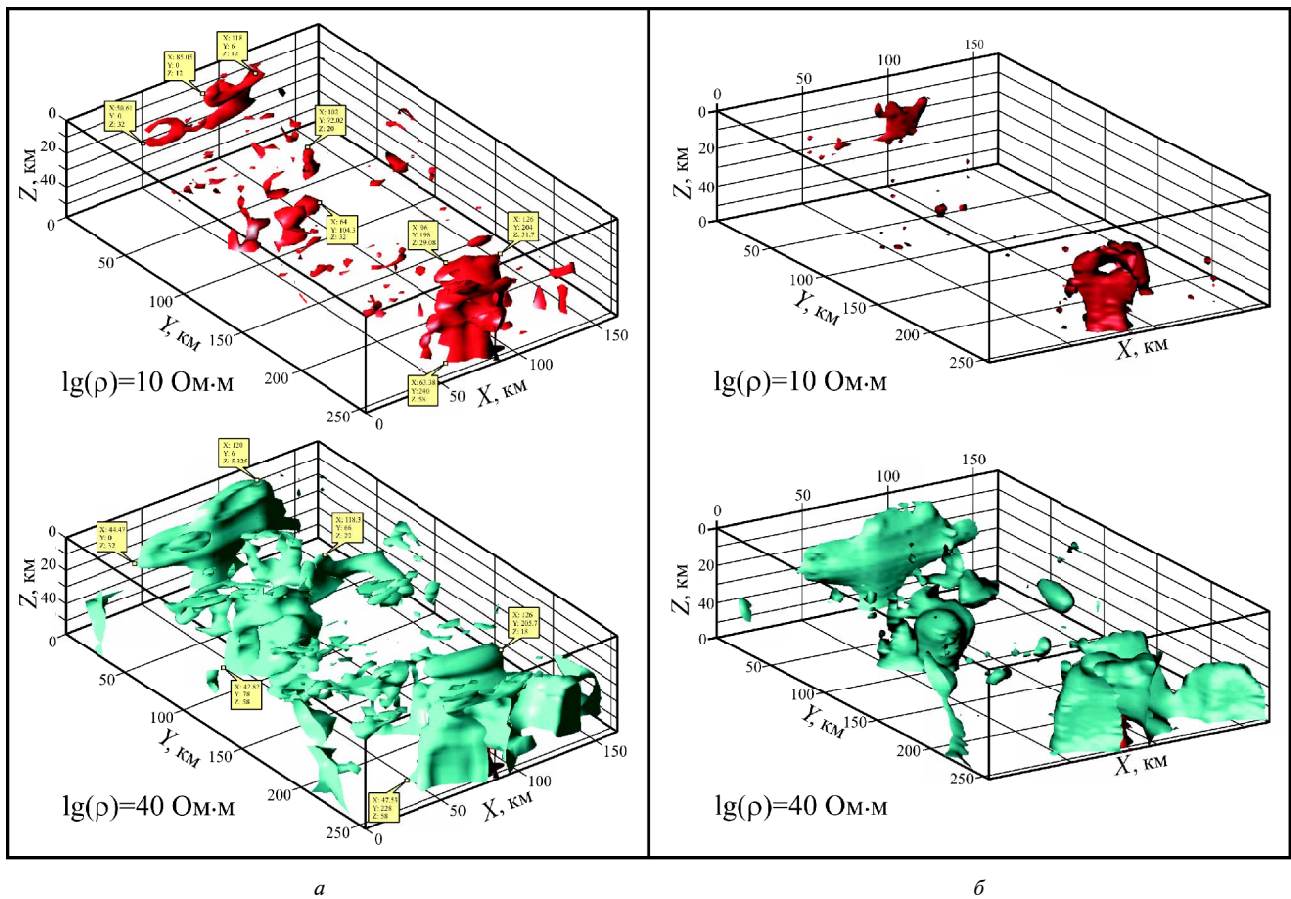


Рис. 3. Сопоставление 3D моделей в программах MATLAB (а) и VOXLER (б). Логарифм удельного электрического сопротивления $\lg(\rho)$ для изоповерхностей 10 и 40 Ом·м

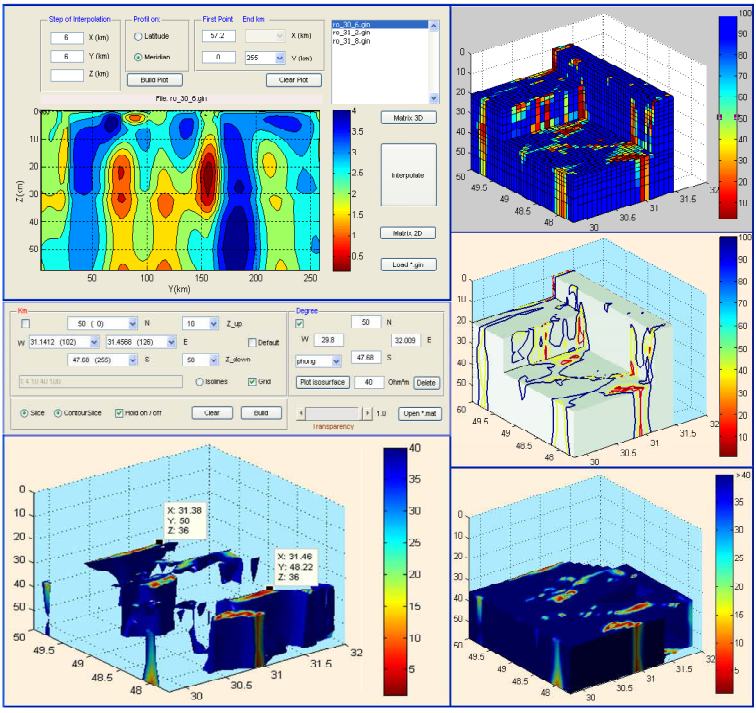


Рис. 4. Интерфейс программы TAR3D для создания объемных геоэлектрических моделей и варианты построений

лям, затем визуализирует их в изолиниях вместе с пунктами наблюдений и окончательно формирует mat-файл в трехмерном формате (переменные: X – долгота, Y – широта, Z – глубина, R_0 – сопротивление). Одновременно создается txt-файл с 4 колонками данных (X , Y , Z , R_0) для дальнейшего применения в программе VOXLER или др. Трехмерная матрица R_0 формируется двумя способами (далее жирным шрифтом указаны используемые функции MATLAB):

- а) путем многократной послойной интерполяции: $[X, Y] = \mathbf{meshgrid}(\dots)$, $R_0 = \mathbf{griddata}(\dots)$ с заменой в плоскости (Z_i) трехмерной NaN (нечисловой) матрицы;
- б) применяется однократная интерполяция по всем слоям (Z_{all}): $[X, Y, Z] = \mathbf{meshgrid}(\dots)$, $R_0 = \mathbf{griddata3}(\dots)$.

Первый способ предпочтителен, поскольку строится визуально более естественная гладкая изоповерхность. Была получена матрица размером: $44 \times 29 \times 30$, $X = 0 \div 165$ км; $Y = 0 \div 255$ км; Z – разные глубины (км), по данным двумерного моделирования (программно предусмотрен постоянный шаг интерполяции). Горизонтальная ячейка: 6×6 км, крайние ячейки: 3×3 км (с учетом размера площади).

Вторая программа в MATLAB предназначена для объемных построений в виде изоповерхностей, срезов, блоков, каркасных изображений, комбинированных вариантов в метрической и градусных единицах. Для перекрывающихся объектов применяется прозрачность. При построении блоков используются функции MATLAB **slice**(...) и **contourslice**(...). Одновременно строятся 6 плоских объектов (залитые цветом контурные графики, по желанию – с изолиниями), заданные интервалами для координат X , Y , Z . Нет необходимости в выводе по одному контурному графику на плоскость, подобно приводимым в примерах MATLAB или VOXLER, что существенно замедляет ход построений. Изменение значений координат при включенной функции hold on приводит к построению следующего блока и т. д. Предусмотрено удаление неудачно подобранных блоков. Таким образом, достаточно быстро конструируется модель любой сложности. Интерактивно можно отключать ненужные плоскости. По заданным упомянутым выше интервалам координат с помощью функций **patch(isosurface(...))** строятся изоповерхности. В плоскостях сечений, образуемых интервалами координат XYZ , с помощью функций **patch(isocaps(...))** незамкнутая изоповерхность закрывается контурным слоем, абрис которого проходит по срезу изоповерхности (в VOXLER такой возможности нет) (рис. 5).

Сравнение программ трехмерной визуализации. Сравнение моделей, построенных с помощью MATLAB и VOXLER, несмотря на наличие сход-

ных участков, выявляет некоторые различия (см. рис. 3). В среде MATLAB модель имеет большее количество мелких и средних объектов, программа VOXLER их попросту удаляет или дробит на части. Такие различия возникли вследствие более дробной интерполяции в VOXLER. Тем не менее крупные объекты есть как в MATLAB, так и в VOXLER. “Обтесывание” объектов в VOXLER с помощью упрощенного метода интерполяции, используемого по умолчанию, может быть как полезным приемом, так и отрицательным, поскольку можно утратить и ценную информацию, если объект располагается на краю или проведена недостаточная детализация.

Трудно рассмотреть особенности строения объектов в одном изображении, поскольку часть объектов в двумерном плане сливается. Возникает ошибочное представление о размерах и пространственном размещении. Поэтому трехмерные модели, опубликованные в разных изданиях, часто вполне обоснованно подвергаются критике. Воспользоваться такой визуальной моделью для практических целей нельзя. Расстановка маркеров с указанием координат и параметров не улучшает ситуацию. Тем не менее создатели 3D моделей имеют явное преимущество, поскольку у них не возникает затруднений построить 3D изображение в любом сечении (рис. 5). Для дальнейшего применения пригодны только построения, проецируемые на двумерную плоскость.

В программе VOXLER очень легко создавать модели различной сложности, однако в ней нет специального инструмента, позволяющего интерактивно на объекте получать координаты X , Y , Z . Простое вращение не компенсирует указанный недостаток. Следует также отметить, что использование по умолчанию сетки (разрешения) и метода интерполяции обуславливает некорректное отображение объемной модели, что сразу же приводит к нарушению общепринятых правил моделирования.

Рассмотрим основные недостатки программы VOXLER при ее применении в геолого-геофизической практике. Интерфейс программы не позволяет быстро изменить координаты планшета и шаг представления интерпретационных данных. Нельзя произвольно задать оцифровку изолиний, так как это происходит автоматически. Изолинии не имеют подписей, и по сути расшифровка представляет собой угадывание.

Попытка построить модель в виде многочисленных прямоугольных блоков с контурной графикой, подобно создаваемым в среде MATLAB (см. рис. 4), выявила значительные временные затраты и моментальный отказ от подобных действий. Поэтому пришлось остановиться на построении одного прямоугольного блока. Указанное свидетельствует скорее о любительских

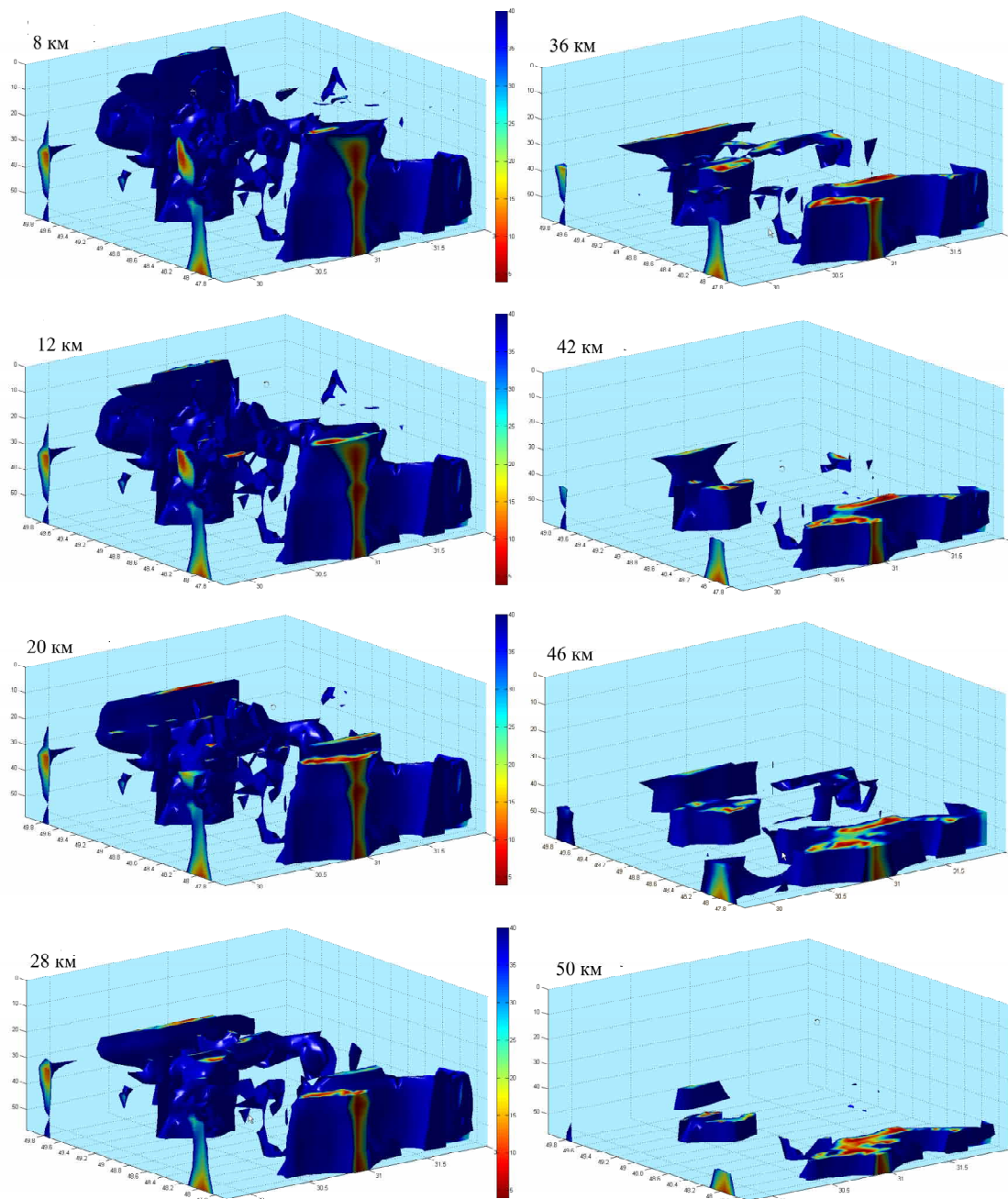


Рис. 5. Исоповерхности $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на различных уровнях среза по глубине

возможностях программы, нежели профессиональных. Наличие только собственного 3D формата (т. е. сохранение в виде файла с редким расширением) не дает возможности перебрасывать конечный рисунок в другие программы, которые могли бы существенно улучшить изображение. Поэтому окончательная доводка изображения результативной модели для опубликования выполняется, как правило, в других редакторах (PSP, CorelDraw и пр.) (рис. 6).

В остальном же разработчиков программы VOXLER следует оценить по достоинству. Процесс изготовления изображений по имеющимся данным не занимает много времени. Программа компактна, многовариантна, проста в обращении, полезна при создании презентаций, так как дает

возможность легко создавать видеофайлы, что позволяет в реальном времени рассмотреть объекты с различных позиций. Остается непонятным, почему разработчики VOXLER не пожелали создать ее полноценно профессиональной. Для этого практически многое сделано, необходимы лишь незначительные дополнения, изложенные выше.

В настоящее время программа TAR3D использует вариант построений по данным, размещенным по взаимно перпендикулярным профилям, и не может применить данные, расположенные по линиям, произвольно ориентированным в пространстве. В случае необходимости несложно внести дополнения в первую часть программы, которая формирует данные в 3D формате. Вторая часть

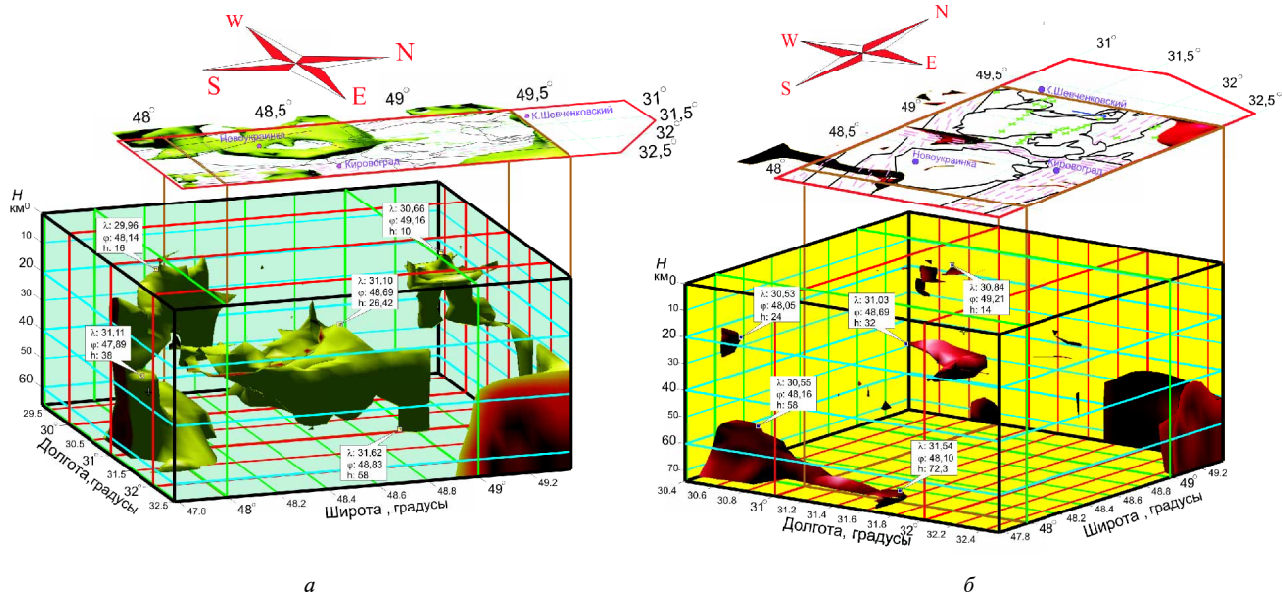


Рис. 6. Пример 3D модели. Положение объектов пониженного сопротивления с ρ , меньшим 40 Ом·м (а) и меньшим 10 Ом·м (б). Вид с юго-востока

программы (вывод графики) останется без изменений.

Выводы. Существенное преимущество программы TAR3D – строгое соблюдение единой схемы построения трехмерной модели. Горизонтальный масштаб выбирается с учетом расположения пунктов наблюдений на исследуемой площади (шаг не менее 1/5 среднего расстояния между пунктами). Выбор вертикального масштаба должен учитывать те же требования. При несоблюдении этих правил, а также пропорций объекты будут всегда иметь вид линейно вытянутых.

1. Вид построенных в TAR3D и VOXLER трехмерных моделей различается, так как в VOXLER метод и шаг интерполяции “вши-ты” в программу и не поддаются коррекции. Расхождение в пространственном разрешении автоматически предполагает визуальное несходство. Поэтому незначительные изменения в исходных данных даже по одному профилю могут резко изменять вид объемных изображений.
2. В TAR3D по сравнению с VOXLER достигается лучшее построение 3D моделей. Однако полученные результаты следует использовать с особой осторожностью, поскольку они характеризуют лишь предполагаемые изменения в пространстве. Поэтому к построению 3D моделей следует подходить комплексно. Желательно использование данных других методов с иной расстановкой пунктов наблюдений. В процессе детальных исследований это позволяет более обоснованно заложить новые пункты измерений.
3. Программа VOXLER имеет существенные недостатки, что препятствует ее применению для

детальной 3D визуализации научных данных. Ее хорошо использовать для ускоренного создания презентаций, хотя и в этом случае критических замечаний не избежать.

4. При построении 3D моделей применяются общие математические и программные решения, поэтому с помощью программного комплекса TAR3D авторам удалось решить поставленную задачу. Коллективам, которые не используют в своей работе MATLAB, для создания полноценной ГИС рекомендуется использование программного пакета ARCGIS. Он функционально имеет максимально широкие возможности относительно используемых проекций, систем координат, применения спутниковых данных, комбинированных многомерных построений и пр. Правда, не следует ожидать лучшего результата от ARCGIS при построении 3D моделей, который в значительной степени зависит от исходных данных и выбора сетки построений (разрешения).

1. *Бурахович Т.К.* Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Кировоградской аномалии электропроводности / Т.К. Бурахович, С.Н. Кулик // Геофиз. журн. – 1999. – Т. 21, № 2. – С. 120–125.
2. *Бурахович Т.К.* Квазитрехмерная геоэлектрическая модель западной части Украины / Т.К. Бурахович, С.Н. Кулик // Там же. – 2001. – Т. 23, № 4. – С. 83–90.
3. *Волыно-Подольская плита (геофизика, глубинные процессы) / [В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя и др.].* – Киев: Наук. думка, 2012. – 193 с.
4. *Гинтов О.Б.* Взбросы и надвиги в земной коре Кировоградского рудного района и связь с ними уранового оруденения / О.Б. Гинтов, С.В. Мычак // Геофиз. журн. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 84–91.

5. Днепровско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы) / [В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя и др.]. – Киев: Корвін пресс, 2006. – 144 с.
6. Логвинов И.М. Геоэлектрическая 2D модель вдоль профиля Рахов–Борщев / И.М. Логвинов, В.Н. Тарасов, Б.Т. Ладанівський // Доп. НАН України. – 2006. – № 11. – С. 114–118.
7. Логвинов И.М. Геоэлектрические параметры земной коры Днепро-Лабской зоны на территории Восточно-Европейской платформы по данным одномерной инверсии магнитотеллурических зондирований / И.М. Логвинов, В.Н. Тарасов // Геофиз. журн. – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 61–68.
8. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы) / [В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя и др.]. – Киев: Логос, 2011. – 128 с.
9. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы) / В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя и др.]. – Киев: Корвін пресс, 2005. – 210 с.
10. Siripunvaraporn W. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data / W. Siripunvaraporn, G. Egbert // Geophysics.–2000. – V. 65, N 3. – P. 791–803.

¹Институт геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины,
Киев, Украина
E-mail: tarig@igph.kiev.ua

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины,
Киев, Украина
E-mail: litvinovda@mail.ru

В.М. Тарасов, І.М. Логвінов, Д.О. Літвінов

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГРАФІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ 3D МОДЕЛЕЙ ЗА ДАНИМИ МАГНІТОТЕЛУРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ

Наведено нову програму (TAR3D) тривимірної візуалізації даних, що створена в середовищі MATLAB. На прикладі результатів двовимірного моделювання даних магнітотелуричних зондувань Кіровоградського рудного району показано можливості програми. Програму зіставлено з відомими у світі подібними програмами.

Ключові слова: геоінформаційні технології, магнітотелуричне зондування, Кіровоградський рудний район.

V.N. Tarasov, I.M. Logvinov, D.A. Litvinov

A COMPARATIVE ANALYSIS OF GRAPHIC PRESENTATION OF 3D MODELS BASED ON MAGNETOTELLURIC SOUNDING DATA

A new program (TAR3D) three-dimensional data visualization, created by environment MATLAB is presented. On the example of the two-dimensional data modeling of magnetotelluric sounding in Kirovograd ore area, the authors show the potential opportunities of the program. A comparative analysis of the existing programs has been made.

Keywords: GIS technology, magnetotelluric sounding, Kirovograd ore district.