

© И.В. ОГОРОДОВА

*irinaog@mail.ru*

УДК 550.3

## **ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*АННОТАЦИЯ. Показаны возможности использования геоинформационной системы ArcGIS 9.3 (ESRI, США) для построения геофизических поверхностей с помощью GRID и TIN моделей и рассмотрена технология построения непрерывных трехмерных сред.*

*SUMMARY. The possibility of using geographic information system ArcGIS 9.3 (ESRI, USA) for the construction of geophysical surfaces with GRID and TIN models is discussed in the given work, as well as the technology of continuous three-dimensional media design.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Геоинформационная система, физико-геологическая модель, природные чрезвычайные ситуации.*

*KEY WORDS. Geo-information system, physical-geological model and natural emergencies.*

На определенном этапе изучения любого геологического объекта, когда накоплен значительный объем геолого-геофизической информации, отражающей его строение, представляется возможность создания его трехмерной модели, адекватной реальной геологической ситуации. На практике наиболее полная реализация данных, характеризующих исследуемый объект, возможна путем создания его цифровой трехмерной модели. Формирование компьютерной (математической) модели и ее сохранение в базе данных существенно облегчает процесс исследования, позволяя не только относительно просто обращаться к ней, воссоздавая и визуализируя структуру контактных поверхностей, отдельных пластов, разрезов в любых плоскостях, но и дает возможность относительно легко корректировать строение модели по мере обновления геолого-геофизической информации [1].

Использование трехмерной цифровой модели геологического объекта при изучении его структуры гораздо эффективнее привлечения для тех же целей плоских отображений в виде карт и разрезов, число которых всегда ограничено, в том числе и из-за трудоемкости их создания. Даже на начальном этапе исследований работа по формированию цифровой объемной модели способна изменить существующие представления о геологическом строении изучаемого объекта, так как сама по себе трехмерная модель дает в руки исследователю качественно иное отображение всей совокупности привлеченной для ее создания информации, которое принципиально отличается от традиционных форм визуализации геолого-геофизических данных, таких как двухмерные карты и разрезы.

Наиболее распространенным способом трехмерного представления геофизических полей является визуализация их в виде поверхностей  $Z(X,Y)$ , где  $Z$  — значение поля. В геоинформационных системах для представления поверхностей используются два типа моделей: модель TIN и модель GRID (рис. 1).

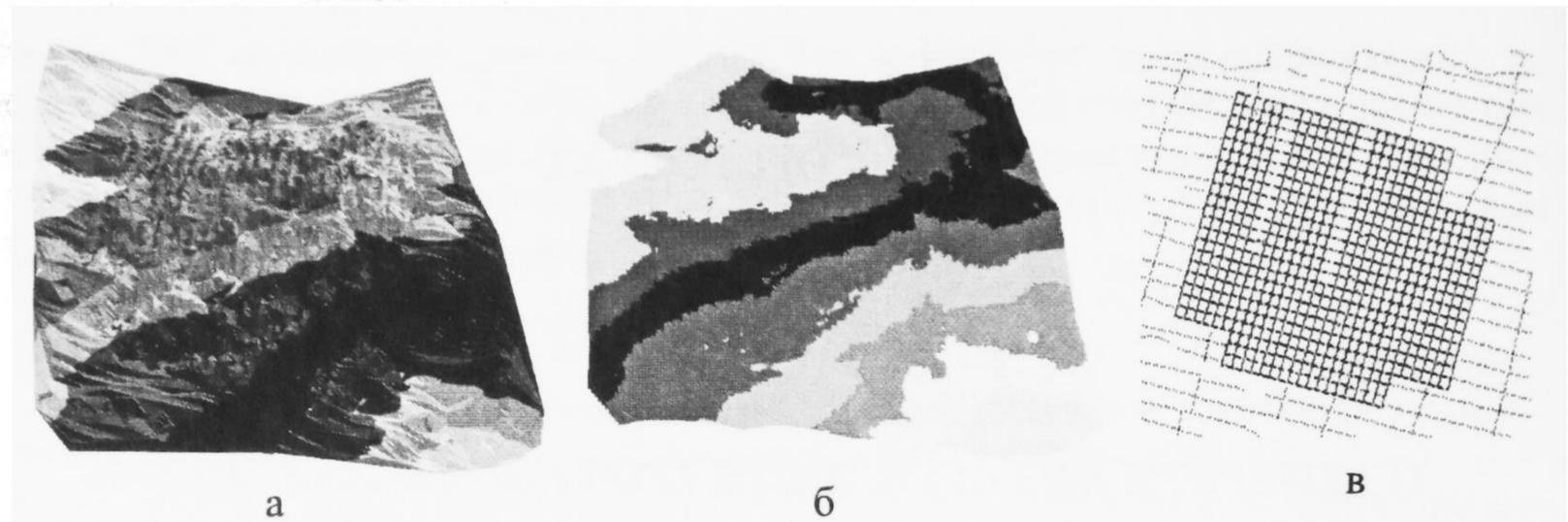


Рис. 1. Цифровые модели наблюдаемого гравитационного поля: а — TIN-модель; б — GRID-модель; в — положение точек наблюдения

Видим, что в целом районирование гравитационного поля получилось одинаковое, но детали некоторых участков отличаются, поэтому для изучения геологического строения желательно использовать оба типа моделей.

TIN-модель позволяет осуществлять построение поверхности по нерегулярному набору точек наблюдения с известными значениями поля ( $Z$ ) и представляет поверхность в виде совокупности треугольных граней. В TIN-модели по исходным точкам выполняется триангуляция Делоне по исходным точкам, основным принципом алгоритма является построение треугольников, которые вместе будут близки к равносторонним фигурам. При такой интерполяции значения поля для новых точек будут более близки к известным исходным точкам, что позволяет оптимизировать модель поверхности. TIN-топологическая структура данных, состоит в том, что управляет информацией об узлах, которые входят в каждый треугольник, и о соседях каждого треугольника. Структура данных TIN позволяет точно воссоздать любой тип поверхности. В TIN-модели можно не только интерполировать значения геофизического поля для любого местоположения, но и хранить естественные перегибы в уклоне поверхности. Некоторое ограничение TIN состоит в том, что они не могут моделировать случаи с отрицательными уклонами поверхности [2].

**GRID-модель.** Термин «грид» заимствован от англоязычного grid, что в переводе означает решетка, сетка, сеть. Структура GRID-моделей полностью соответствует структуре растровых данных. Грид состоит из массива регулярно распределенных прямоугольных, чаще квадратных, ячеек со значениями поля  $Z$ . Размер ячейки определяет разрешение грида: чем меньше размер ячейки, тем точнее модель грида. Ячейки грида могут иметь целочисленные значения или значения с плавающей запятой.

Как правило, пункты геофизических наблюдений расположены неравномерно, поэтому при построении GRID-моделей необходимо проводить пересчет нерегулярно распределенных данных в регулярные узлы с помощью процедур интерполяции, аппроксимации, сглаживания и иных трансформаций исходных данных.

В геоинформационной системе ArcGIS алгоритмы интерполяции реализуются в дополнительных модулях Spatial Analyst и 3D Analyst. Интерполяция основана на предположении, что пространственно распределенные объекты связаны пространственной корреляцией, т.е. близко расположенные объекты

обладают сходными характеристиками. Наиболее распространенными приемами интерполяции являются: метод обратно взвешенных расстояний (ОВР), сплайн, тренд и кригинг. Каждый из них опирается на определенные предположения о том, как точнее вычислить значения ячеек.

Методы интерполяции ОВР, сплайн и тренд называют детерминистическими методами интерполяции, поскольку они непосредственно основаны на измеренных значениях в окрестности точек или на заданных математических формулах, определяющих сглаженность результирующей поверхности. Другая группа методов (в том числе кригинг) носит название геостатистических и основана на статистических моделях. В отличие от детерминистских подходов к интерполяции, геостатистика предполагает, что все значения, полученные на изучаемой территории, являются результатом случайного (стохастического) процесса. В геостатистике данные используются дважды: сначала для оценки пространственной автокорреляции, а затем для выполнения интерполяции. Структура поверхности оценивается с использованием математического уравнения, которое наиболее близко представляет общее изменение поверхности, подобно поверхности тренда. Локальное поведение поверхности и уровень шумов оценивается с использованием вариограммы. Метод кригинг часто дает довольно точные оценки промежуточных значений поля в узлах сети, но для вычислений требуется много времени. Кроме того, метод кригинг очень чувствителен к форме пространственного распределения исходных точек [3].

Достоверность результатов интерполяции зависит от качества исходных данных и применяемого метода интерполяции. Для наилучшего соответствия расчетных значений реальным следует использовать разные способы интерполяции, в зависимости от того, какое явление отражают значения и как распределены точки замеров. Однако при любом методе интерполяции качество результата прямо пропорционально количеству исходных точек.

Основным преимуществом грид-моделей является простая структура данных, позволяющая осуществлять различные операции над ними средствами матричной алгебры. Это дает возможность широко использовать грид-модели при обработке геофизических полей.

На рис. 2 представлен пример применения GRID-моделей для решения задачи выделения локальной составляющей гравитационного поля. Построение грид-модели наблюденного поля осуществлялось с помощью интерполяции естественной окрестности, известной также как интерполяция Сибсона или интерполяция «захватывающей области». Достоинством данного метода является то, что в результате интерполяции создается гладкая поверхность, проходящая через исходные точки и не имеющая пиков, ям, ребер или точек минимума, которые не отражаются в исходных данных.

Для оценки характера регионального фона была построена серия грид-моделей поверхностей тренда, основанная на полиномах 1-5 порядков. По численному выражению качества интерполяции — среднеквадратической ошибке, за региональную компоненту поля выбран полином 2 порядка. Расчет грид-модели локального гравитационного поля проводился путем вычитания из наблюденного поля региональной компоненты. Как правило, грид-модели поверхностей используются в тех случаях, когда применяются региональные и мелкомасштабные представления геофизических полей, в то время как TIN-модели — для более детального крупномасштабного моделирования [4].

TIN-модели поверхностей являются основой для создания мульти-патчей, которые представляют собой модели трехмерных объектов, охватывающих определенный интервал (зону) изменения картируемого параметра. Для их создания в качестве исходных данных используются TIN-модели кровли и подошвы слоя, а также полигональный слой, определяющий местоположение объекта в географическом пространстве. Наиболее часто мульти-патчи используются для представления результатов интерпретации геофизических данных — пластовых моделей геологического разреза (рис. 3).

Трехмерная визуализация объектов происходит в специализированном приложении ArcScene, которое позволяет создавать перспективные обзорные сцены, где можно управлять отображением и взаимодействовать с данными геоинформационных систем. В ArcScene можно накладывать векторные и растровые данные на поверхность, вытягивать по высоте объекты из векторных источников данных, создавая эффект трехмерных фигур [5].

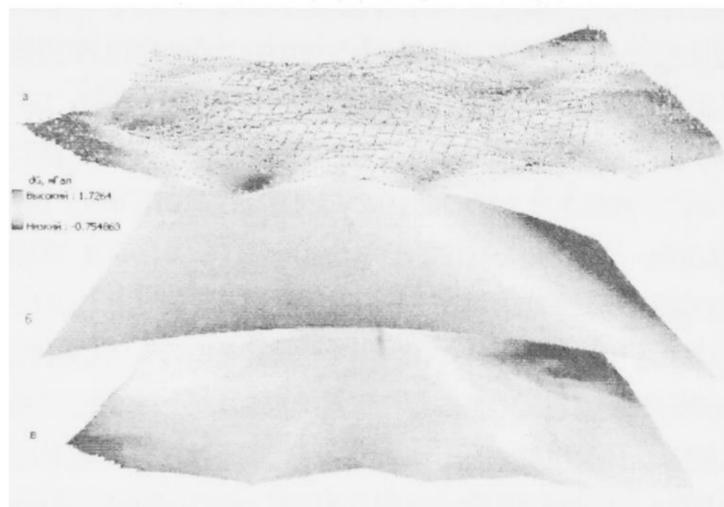


Рис. 2. Гравитационное поле:  
а — локальное; б — региональное;  
в — наблюдаемое. Точками отмечены  
гравиметрические пункты

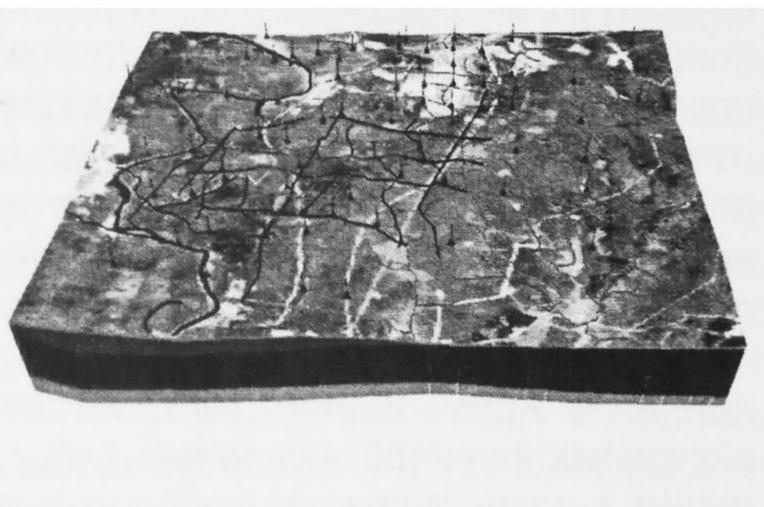


Рис. 3. Структурная модель разреза  
надсолевой толщи по скважинным  
данным с учетом топографии местности

Помимо моделирования поверхностей и пластов, в ArcGIS имеется возможность построения трехмерных моделей непрерывных сред. Технология их создания базируется на представлении геолого-геофизической среды в виде набора элементарных блоков (кубов), каждый из которых имеет числовую характеристику (геофизический параметр) и пространственное положение, описываемое координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  [6]. Полученные кубы информации позволяют детально изучить особенности распределения геофизических полей в некотором объеме геологической среды с помощью построения произвольных вертикальных и горизонтальных сечений, а также разрезов куба вдоль отдельных профилей наблюдений.

Процесс построения объемных гридов включает целый набор процедур: выборку данных по вертикальной координате  $Z$  с нужным шагом; экспорт выборок в отдельные файлы; построение грид-моделей геофизического поля на различных уровнях  $Z = \text{const}$ ; конвертация грид в точки для получения дискретных значений; отображение полученных кубов данных в ArcScene [7]. В ArcGIS имеется возможность автоматизации технологического процесса обработки данных путем выстраивания процессов в связанную цепочку в блок-схеме модели геоинформационной обработки. Построение моделей осуществляется в окне Model Builder. При запуске модели процессы выполняются в автоматическом режиме в заданной последовательности. Созданная модель обработки может использо-

ваться повторно применительно к новому набору исходных данных. На рис. 4 представлена модель геоинформационной обработки, реализующая приведенные выше процедуры построения трехмерных моделей.

С помощью модели куба данных (рис. 4) автором было выполнено построение трехмерных геолого-геофизических моделей приповерхностной части разреза по одному из участков Соликамской депрессии Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. В качестве исходных данных взяты результаты интерпретации материалов вертикального электрического зондирования и временных полей первых волн, регистрирующихся в начальной части сейсмограмм метода отраженных волн общей глубинной точки.

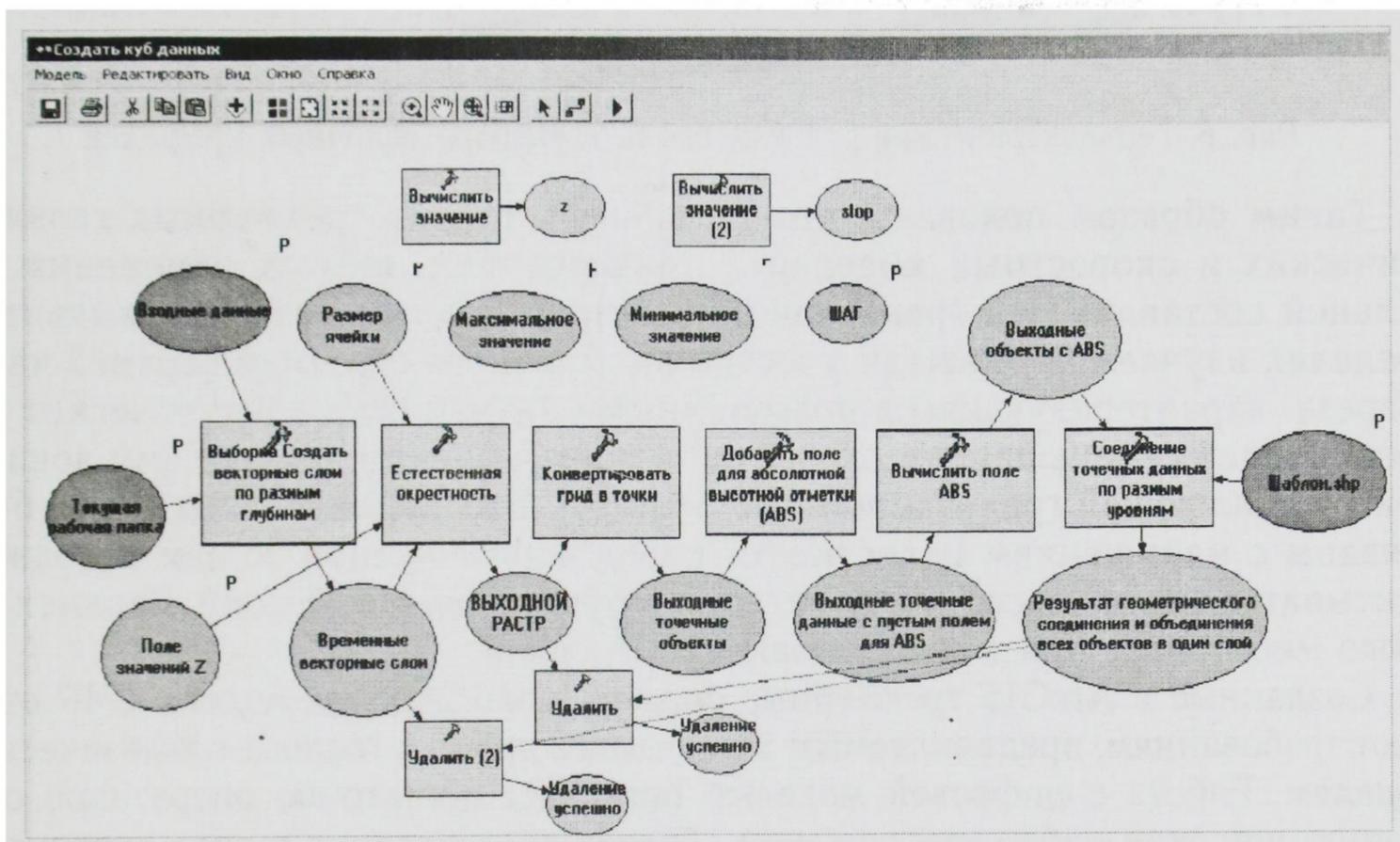


Рис. 4. Модель геоинформационной обработки — построение куба данных

Полученная геоэлектрическая модель изучаемого интервала геологического разреза представлена на рис. 5 и 6. Различные варианты визуализации трехмерной модели показывают динамику пространственного изменения геоэлектрических свойств среды, проявляющуюся в послойном строении геоэлектрического разреза и существенной латеральной изменчивости электрических свойств среды.

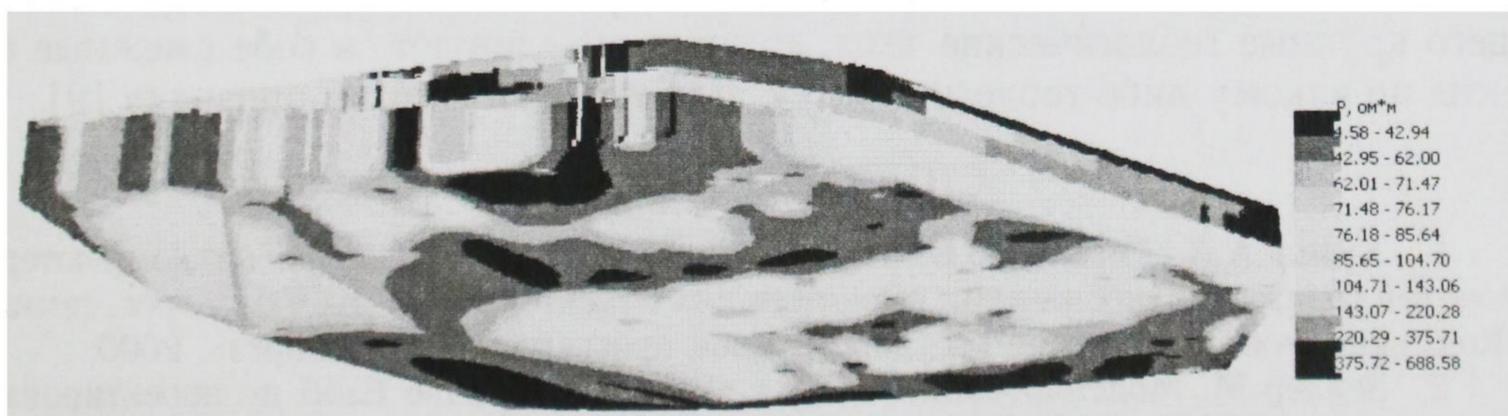


Рис. 5. Куб удельных электрических сопротивлений по данным ВЭЗ

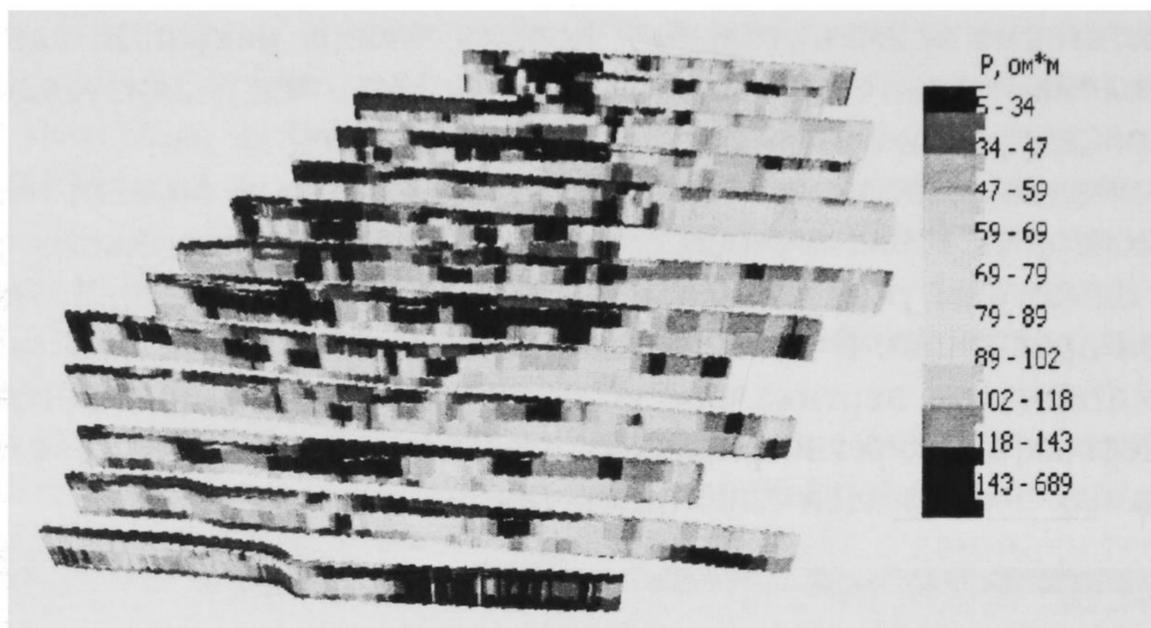


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы вдоль электроразведочных профилей

Таким образом показано, что детальный анализ трехмерных геоэлектрических и скоростных моделей с привлечением данных изменения локальной составляющей гравитационного поля (рис. 2) позволил выявить в пределах изучаемой площади участки аномального строения верхней части разреза, характеризующиеся повышенными значениями электрических сопротивлений, уменьшением скоростей и пониженными значениями локальной составляющей гравитационного поля [8]. Выделенные зоны могут быть связаны с нарушением целостности пород водозащитной толщи и должны учитываться в процессе эксплуатации крупнейшего в России Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Созданные в ArcGIS трехмерные физико-геологические модели ВЧР отвечают требованиям, предъявляемым в настоящее время к геолого-геофизическим моделям. Работа с цифровой моделью позволяет достаточно оперативно обеспечить широкий набор изображений объекта исследования в виде карт и разрезов произвольной ориентации и в любых комбинациях. Это позволяет путем последовательного перебора большого числа вариантов представления модели геологического объекта выбрать и практически реализовать оптимальные виды и ракурсы, определить значимые особенности геологического строения месторождения полезных ископаемых. Трехмерные тела могут быть выделены с любым уровнем детальности: от наиболее детального, соответствующего разрешающей способности метода ВЭЗ, сейсморазведки, до грубого, представляющего крупные геологические тела, которые объединяют в себе смежные объекты по какому-либо геологическому или геофизическому признаку [9].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аузин А.А., Глазнев В.В. Формирование трехмерных цифровых компьютерных моделей горизонтальнослоистых геологических объектов // М-лы VII Всерос. семинара «Компьютерное обеспечение Государственной программы Госгеолкарта», 2000.
2. Зейлер М. Моделирование нашего мира. Руководство ESRI по проектированию базы геоданных. NY.: ESRI Press, 1999. 254 с.
3. ArcGIS 3D-Analyst. Руководство пользователя. ESRI, 2000.

4. Минами М. ArcMap. Руководство пользователя. Ч. 1. М.: ДАТА+, 2001. 290 с.
5. Минами М. ArcMap. Руководство пользователя. Ч. 2. М.: Дата+, 2001. 220 с.
6. Финчук В.В., Моргун С.И. Подсчет запасов полезных ископаемых «легкими» методами // ArcReview. 2009. № 4 (51).
7. Митчелл Э. Руководство ESRI по ГИС анализу. Т. 1: Географические закономерности и взаимодействия. NY.: ESRI Press, 1999. 190с.
8. Долгаль А.С., Костицын В.И. Гравиразведка: способы учета влияния рельефа местности. Пермь: Перм. ун-т, 2010. 88 с.
9. Огородова И.В. Применение геоинформационных технологий для создания комплексной физико-геологической модели надсолевой толщи разреза Соликамской депрессии // М-лы 38-й сессии Междунар. сем. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Пермь, 2011. С. 214-219.