

Будинаж явился результатом растяжения и растаскивания жесткого слоя верхнего девона на отдельные линзы (будины), совершаемых под влиянием раздвиговых напряжений параллельно общей слоистости. Будины ограничены сбросами скальвания, по которым происходило крутое погружение кровли девонского ССК, сопровождающееся проседанием толщи меловых отложений. Разрывные нарушения между будинами предопределили место заложения и северо-западную ориентировку современной овражной сети на водоразделах правобережной части исследуемой территории.

Северо-западные тренды оврагов и балок дают основание утверждать, что главное сдвиговое напряжение имеет выдержанную северо-восточную ориентацию. Развитие овражно-балочного рельефа на водоразделах, происходившее по оценкам геологов в последние 500÷1000 лет, связано с активизацией современных тектонических процессов. Величина скальвающего напряжения в породах ВЧР, рассчитанная по формуле (3), равна 20÷40 кПа. Эти значения  $\tau$  хорошо согласуются с удельным сцеплением ( $C$ ) частиц покровных и флювиогляциальных суглинков (табл. 5).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). – М., 1973. – 186 с.
2. Hast N. The state of stresses in the upper part of the Earth crust // *Tectonophysics*. -1969. – Vol. 8. – P. 670-688.
3. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Поле тектонических напряжений по данным измерений в Хибинском массиве // *Напряженное состояние земной коры*. – М., 1973. – С. 50-58.
4. Солодухин М.А., Архангельский И.В. Справочник техника-геолога по инженерно-геологическим и гидрогеологическим работам. – М., 1982. – 288 с.
5. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М., 1976. – 328 с.
6. Тарков А.П. Сейсмические, петрофизические и деформационно-прочностные характеристики пород верхней части разреза зоны влияния НВ АЭС // *Вестн. Воронеж. ун-та. – Сер. геол.* – 1998. – № 5. – С. 186-190.
7. Гзовский М.В. Геофизическая интерпретация данных о новейших и современных глубинных тектонических движениях // *Современные движения земной коры*. – М., 1963. – № 1. – С. 37-63.
8. Магницкий В.А., Артющков Е.В. Некоторые общие вопросы динамики Земли // *Тектоносфера Земли*. – М., 1978. – С. 487-521.
9. Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // *Geophysics*. -1974. – Vol. 39. – P. 770-780.
10. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – М., 1979. – С. 143.
11. Геологический словарь. – М., 1973. – 483 с.
12. Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектонические течения горных пород литосферы // *Тектоническая расслоенность литосферы* // Тр. ГИН. -1980. -Вып. 343. – С. 105-146.

УДК 550.8.13

## РАЗРАБОТКА ТРЕХМЕРНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

А.А.Аузин, В.В.Глазнев

*Воронежский государственный университет*

В работе сделана попытка сформулировать основные, наиболее общие требования к системам, предназначенным для создания компьютерных объемных моделей геологических объектов в условиях относительного дефицита объективной геолого-геофизической информации, характеризующей их строение. Содержится предварительная информация о системе DGMS-3D, предназначенной для формирования объектноориентированных трехмерных цифровых моделей геологических сред, отражающих распределение в заданном объеме геолого-геофизических или иных параметров, в качестве которых могут выступать литолого-стратиграфические характеристики и петрофизические параметры пород, глубины залегания границ, данные геофизических исследований и пр. Приведены некоторые материалы, полученные в процессе опробования системы DGMS-3D при создании объемной цифровой модели осадочной части разреза в пределах листов М-37-ХVI и М-37-XXII (юг Воронежской области), выполненной по результатам геологического доизучения данной территории.

Автоматизация структурно-геологических построений не только повышает оперативность геометризации геологических объектов и сокращает не требующую высокой квалификации "ручную" составляющую подобных работ, но и во многих случаях позволяет принципиально улучшить адекватность отражения реальной геологической ситуации создаваемой таким образом геолого-математической моделью. Последнее достигается, прежде всего, повышением точности и обоснованности отстройки

геологических границ в областях пространства, где отсутствуют объективные данные о параметрах характеризующих их залегание. К категории объективных мы будем относить данные, полученные в результате прямых геологических наблюдений при изучении керна и геологических обнажений или непосредственно в процессе интерпретации материалов геофизических исследований, но отнюдь не посредством процедур интерполяции или экстраполяции.

Важным положительным качеством компьютерных математических моделей является то, что они легко корректируются по мере получения дополнительных данных или по иным причинам, причем современные программные средства позволяют уточнять строение модели только в локальном объеме, ограниченном сферой влияния вновь вносимой информации, без ее перестройки за пределами этой области. Такая возможность резко повышает оперативность построений, особенно если корректировка ведется в интерактивном режиме.

Наиболее продуктивным представляется создание объемных цифровых моделей геологических сред, поскольку именно они способны максимально полно реализовать геолого-геофизическую информацию, характеризующую объект исследований. Построение подобных моделей можно рассматривать как важнейший элемент компьютеризированной технологии поисково-съёмочных и разведочных работ. Формирование математических моделей геологических объектов весьма актуально и в рамках геологического доизучения территорий, когда в практический оборот одновременно вовлекается огромное количество многоплановой, часто разномасштабной, а случается и противоречивой информации, полученной в результате проведения работ разных лет и самой различной направленности. Подобная специфическая информация требует взаимосвязки и осмысления с единой позиции.

При создании трехмерной модели во всех точках ее объема оказываются определенными задаваемые при ее построении параметры, в качестве которых могут выступать литолого-стратиграфические характеристики пород, глубины залегания границ, данные геофизических исследований, петрофизические параметры пород и пр. По сравнению с плоскими, объемные модели обладают целым рядом существенных преимуществ. В частности, при определении глубины до какого-либо контакта относительно любой точки на дневной поверхности в принципе может быть привлечен весь массив информации, характеризующей его структуру. Конечно, на практике в подавляющем большинстве случаев такой возможностью в полной мере пользоваться не имеет смысла и, обычно, при расчетах ограничиваются объективными данными о глубинном положении контакта, пространственно локализованными в относительной близости от этой точки. Тем не менее, во всех случаях, при формировании разреза объемной модели, оказываются учтенными не только глубины подсечений контактов находящимися на линии профиля или вблизи него скважинами (как это обычно происходит, когда изначально строятся плоские модели), но и характер залегания этих поверхностей в его окрестностях.

Совершенно очевидно, что использование трехмерной цифровой модели любого геологического объекта при изучении его структуры гораздо эффективнее, чем привлечение для тех же целей двухмерных отображений в виде карт и разрезов, число

которых всегда ограничено, прежде всего, по такой тривиальной причине, как трудоемкость их создания. Сама по себе работа по формированию цифровой объемной модели способна изменить существующие представления о геологическом строении объекта моделирования даже на начальном этапе исследований, так как трехмерная модель, пусть весьма схематичная и недостаточно информационно обеспеченная, дает в руки исследователю качественно иное отображение всей совокупности привлеченной для ее создания фактической информации, которое принципиально отличается от традиционных форм представления геологических данных в виде двухмерных карт и разрезов.

При работе с цифровой моделью появляется возможность относительно легко и быстро реализовать любой набор изображений объекта исследования в виде карт и разрезов произвольной ориентации и в любых комбинациях. Это обстоятельство позволяет, путем последовательного перебора практически неограниченного числа вариантов представления модели объекта, оперативно определить и практически реализовать оптимальные их виды и ракурсы, выявить значимые особенности его геологического строения. Квалифицированный выбор режима (или режимов) визуализации трехмерной модели позволяет получить объективные представления о внутреннем строении изучаемого объекта, облегчает выявление и анализ динамики пространственного изменения его вещественных, структурных или иных характеристик.

Реальное повышение точности геометрических построений может быть достигнуто только при наличии достаточного количества объективных данных о геологическом строении изучаемого объекта. В противном случае, если имеет место значительный информационный дефицит, обуславливающий существенную неоднозначность структурно-геологических построений, возможен неоправданный рост роли алгоритмических решений задач интерполяции и экстраполяции, заложенных в используемую систему математического моделирования. Кроме того, ограниченное информационное обеспечение процесса моделирования приводит к резкому росту интерактивного режима работы в ущерб автоматическому, что ставит под вопрос саму возможность повышения оперативности построений. В этих условиях важно выдержать разумный баланс между интерактивным и автоматическим режимами работы, имея в виду, что если первый чреват значительным субъективизмом и требует больших временных затрат, то неоправданное преобладание второго режима может привести к чрезмерной структурной примитивизации модели и, как уже отмечалось, чрезмерному влиянию конкретного математического обеспечения структурно-геологических построений. Необходимо при этом учитывать, что отнюдь не все широко применяемые на практике приемы построений и подходы к реализации геологической информации, даже, казалось бы,

легко объяснимые на интуитивном уровне, могут быть полноценно формализованы. Нередко опытный специалист, руководствуясь минимумом объективных данных, может достигнуть конечного результата достаточно высокой степени достоверности в ситуации, когда, с математически строгой точки зрения, сколько-нибудь обоснованные выводы невозможны в принципе. Как совершенно справедливо отмечается в [1], пользователям-геологам нужна не формальная математизация исследований, а реальное повышение качества результирующих материалов и оперативность их получения.

Поскольку визуальный анализ графических материалов представляемых в виде карт и разрезов, наиболее доступен и привычен любому специалисту, работающему в геологической отрасли, оперативность создания и оптимальная информационная наполненность подобных материалов, являются важнейшими факторами, определяющими прикладную эффективность любой системы, предназначенной для цифрового моделирования геологических объектов. При этом предпочтительно, чтобы система была ориентирована на применение широкодоступной, не слишком дорогой вычислительной техники, а возможно большее число процедур, и прежде всего - процесс визуализации, были реализованы максимально доступными средствами, в особенности, если они встроены в стандартное программное обеспечение Windows [2].

В нефтегазовой отрасли имеется определенный опыт создания цифровых геологических моделей месторождений углеводородного сырья с помощью программных продуктов известных зарубежных фирм [3,4]. Эксплуатация таких систем показала, что они не всегда могут быть полноценно использованы в условиях России, в том числе и по причине весьма жестких требований к качеству, формам представления и объему исходной информации. Подобные "фирменные" системы сложны в применении и требуют специального обучения работающего с ними персонала. Кроме этого, они чрезвычайно дороги и обычно могут быть полноценно использованы только на мощных рабочих станциях, обладающих обширными возможностями компьютерной графики.

Принципы функционирования компьютерных систем, направленных на формирование цифровых моделей нефтегазовых месторождений имеют ряд специфических особенностей, обусловленных среди прочего и тем, что они как правило ориентированы на применение на этапе непосредственно предшествующем разработке, или уже в процессе разработки месторождений, когда объект математического моделирования разбурен по относительно густой и достаточно равномерной сети, состоящей из сотен, а иногда, и тысяч скважин, вскрывших моделируемую часть разреза. Причем, кроме результатов исследований скважин, при моделировании часто привлекаются данные высокоинформативных наземных и скважинных геофизических методов, таких как 3D-

сейсморазведка, ВСП и пр., которые несут в себе дополнительную информацию о геологическом строении межскважинного пространства. Столь высокая информационная обеспеченность обычно не характерна для большинства площадей вовлеченных в сферу геологического доизучения. Совершенно очевидно, что в таких условиях, процесс создания объемной модели будет неизбежно протекать при значительной доле интерактивной составляющей, а при выборе наиболее адекватного в геологическом плане решения большую роль будут играть опыт и профессиональная интуиция работающего над ней специалиста. Таким образом, система, предназначенная для объемного моделирования геологических объектов при относительном дефиците информации, должна быть ориентирована на возможность контроля и корректировки хода структурно-геологических построений на любом их этапе в интерактивном режиме, который в подобных условиях становится ведущим и соответственно требует наилучшего программного обеспечения.

В смысле иллюстрации ограниченной и неравномерной по площади информационной обеспеченности структурно-геологических построений, чрезвычайно характерна ситуация, с которой пришлось столкнуться при создании цифровой геологической модели осадочной части разреза в пределах листа М-37-ХVI площадью 5280 км<sup>2</sup>. Из сформированной при геологическом доизучении его территории базы данных, можно было использовать материалы исследований порядка 700 скважин. Однако только около 5% из их числа вскрыли всю осадочную часть разреза вплоть до пород докембрийского кристаллического фундамента. При этом распределение таких относительно глубоких скважин было крайне неравномерным. Наименьшее их количество оказалось в пределах юго-западной части листа, именно там, где фундамент погружался до 450-500 м и, соответственно, наблюдалась наибольшая представительность разреза.

Подобные обстоятельства вынуждают дополнительно привлекать косвенную информацию при реконструкции пространственного положения не подсеченных скважинами глубокозалегающих границ. В частности, во многих случаях вполне оправдано построение контактных поверхностей, поведение которых охарактеризовано недостаточным количеством прямых данных, на основе их структурного сходства с вышележащими границами, которые обычно подсечены гораздо большим числом более мелких скважин.

Сотрудниками кафедры геофизики Воронежского государственного университета разрабатывается система DGMS-3D (Digital Geological Modeling System - 3D), предназначенная для создания и трехмерной визуализации объемных математических моделей различных геологических объектов. Этой системой формируется объектноориентированная трехмерная цифровая модель, в любой точке которой оказываются определенными задаваемые при ее построении

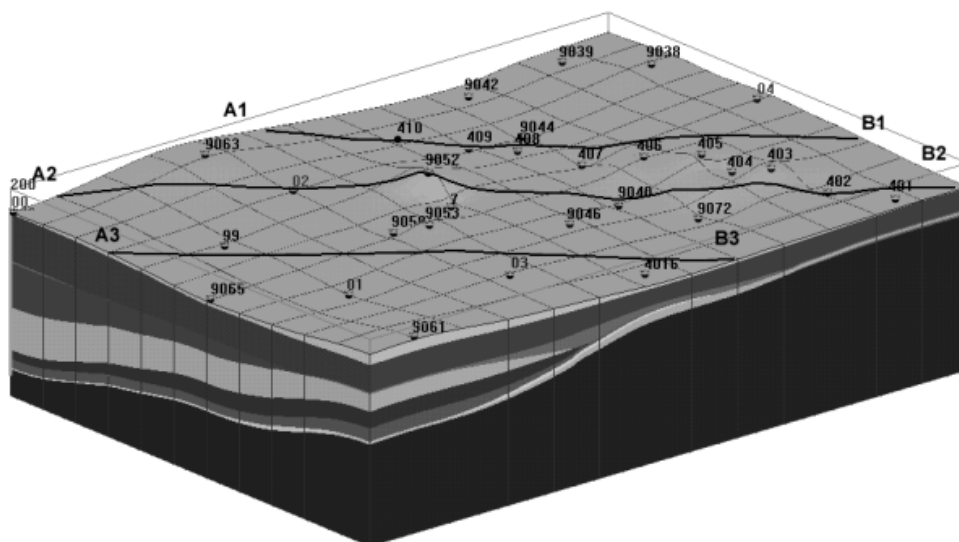


Рис. 1. Трехмерная модель осадочной части разреза (юг Воронежской области).

параметры - литолого-стратиграфические характеристики и петрофизические параметры пород, глубины залегания границ, данные геофизических исследований и пр. Объектный принцип создания модели означает, что каждый элемент модели (будь то рельеф дневной поверхности, контактная поверхность, скважина и т.д.) или их произвольная комбинация, представляет собой отдельный самодостаточный объект, допускающий работу с ним в отрыве от модели в целом.

На нынешней стадии разработки, система позволяет создавать объемные математические модели преимущественно субгоризонтальнослоистых геологических объектов, в том числе и при выклинивании пластов, на основе интерактивного подбора и корреляции геологических границ. На основных этапах этого процесса предусматривается возможность визуализации промежуточных результатов, что дает возможность последовательно контролировать ход создания модели и при необходимости вручную корректировать процесс построения. Корректировка может осуществляться в соответствии с априорной информацией, в частности - ориентируясь на данные наземных или межскважинных геофизических исследований, общие представления об особенностях геологического строения подобных объектов, или любые иные геолого-геофизические материалы, способствующие решению поставленных задач.

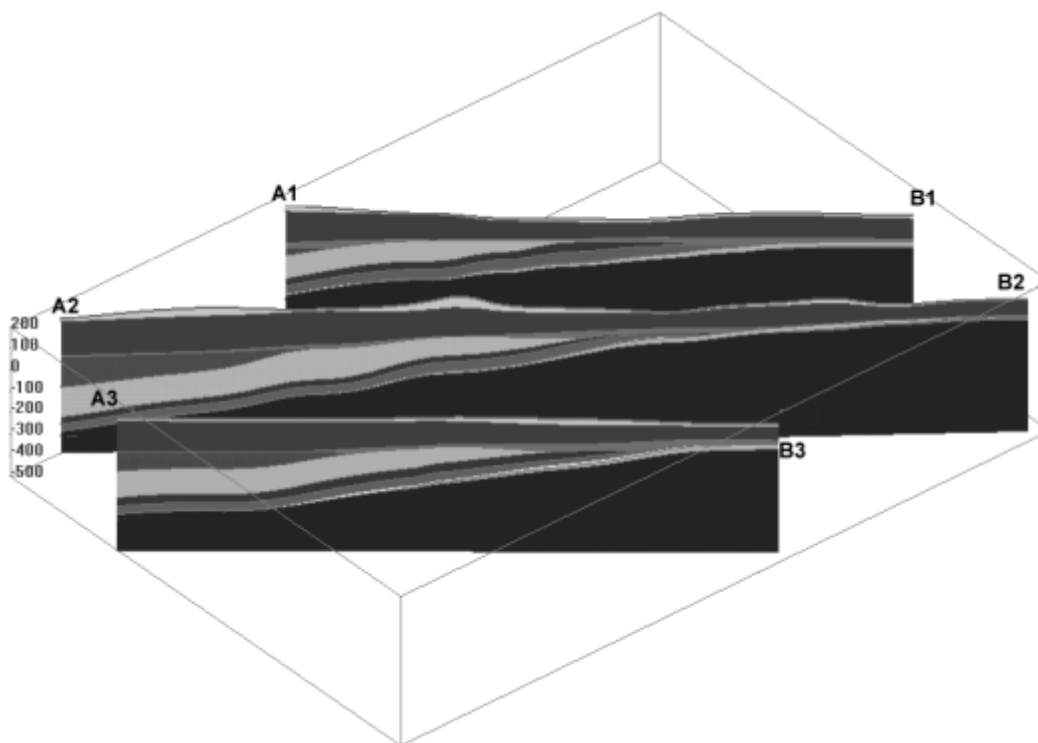
Визуализация трехмерных моделей реализована с использованием графического стандарта OpenGL, что позволяет применять систему на компьютерах среднего уровня, на которых установлена операционная система Windows 95 (Windows NT), без привлечения специализированных аппаратных средств. Трехмерное изображение изучаемого геологического объекта может быть представлено в произвольных ракурсах и различных вариантах, при этом можно выбрать любые цвета пластов или крап их боковых граней, степень прозрачности и вид задания границ.

Система позволяет визуализировать структуру отдельных фрагментов модели (пластов, границ и т.п.), а также результатов расчета разрезов модели любой ориентации, форма представления которых может быть выбрана произвольно, исходя из критериев наилучшей наглядности и информативности, или руководствуясь какими-либо иными соображениями. Все визуализированные объекты могут быть сохранены в нескольких наиболее употребимых форматах (bmp, wmf и пр.).

Ряд возможностей системы проиллюстрирован рисунками 1-3, на которых приведены материалы, отвечающие в основном автоматическому режиму создания цифровой модели, с минимумом ее корректировки в интерактивном режиме. Корректировка проводилась путем введения так называемых "фиктивных скважин", которые фигурируют под номерами - 01...04.

Среди специфических особенностей системы можно отметить то, что она позволяет определять геологическое строение разреза в любой точке земной поверхности. Прогнозный разрез немедленно высвечивается на экране монитора как только задан соответствующий режим работы и обозначено интересующее исследователя место с помощью "мыши".

На рис.1 показаны результаты визуализации трехмерной цифровой модели геологической среды, представленной осадочной частью разреза в пределах части площади листов М-37-ХVI и М-37-ХХII (юг Воронежской области). Для лучшего восприятия иллюстративного материала литолого-стратиграфическое деление разреза существенно укрупнено. При этом, снизу вверх, выделяются породы кристаллического фундамента докембрийского возраста (PR), терригенные отложения среднего ( $D_2$ ) и верхнего ( $D_3$ ) девона, терригенная мамонская толща верхнего девона ( $D_3^{mm}$ ), карбонатные отложения озерской и хованской свит верхнего девона ( $D_3^{oz+hv}$ ), карбонатные отложения турнейского яруса каменноугольного возраста ( $C_1t$ ), терригенные ( $C_1v_1$ ) и карбонатные ( $C_1v_2$ ) отложения визейского



**Рис. 2. Разрезы трехмерной модели осадочной части разреза.**

яруса каменноугольной системы, терригенные породы мелового возраста ( $K_{1+2}$ ), карбонатные породы мелового возраста ( $K_1$ ) и терригенные отложения кайнозоя ( $KZ$ ).

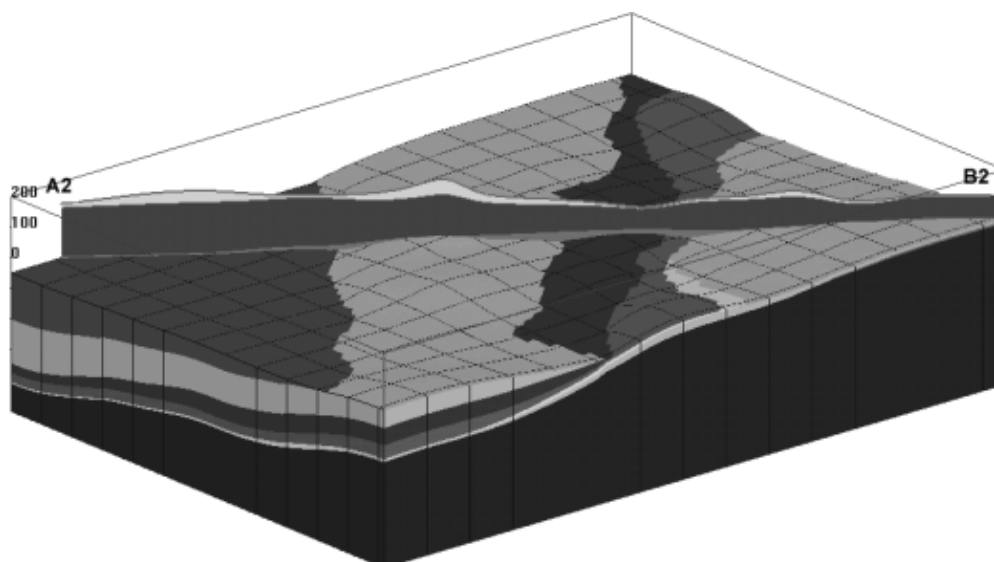
Модель была рассчитана по результатам исследований 27 скважин, которые вскрыли разрез вплоть до пород докембрийского фундамента. Площадь дневной поверхности моделируемого объема - около 3500 км<sup>2</sup>. Для упрощения, топография земной поверхности, показанная в виде сетки, задавалась только по абсолютным отметкам устьев скважин, однако система позволяет использовать любые другие данные и, таким образом, рельеф может быть отстроен максимально подробно.

На рис.2 приведены три взаимопараллельных разреза модели по линиям A1-B1, A2-B2 и A3-B3 которые отмечены на рис.1. Анализ строения разрезов позволяет выявить и проследить литолого-стратиграфические особенности моделируемого объекта. При необходимости система позволяет строить разрезы и вдоль ломаных линий любых конфигураций.

На рис.3 показана объемная модель отложений домезозойского возраста, органично дополненная разрезом вышележающих пород мела и кайнозоя. Проекция модели домезозойских отложений на горизонтальную плоскость будет представлять собой геологическую карту кровли пород этого возраста. Для получения подобной карты достаточно развернуть модель под нужным ракурсом. Выполнение такой операции система позволяет проводить и в автоматическом режиме.

Следует подчеркнуть, что область применения данной системы компьютерного трехмерного

моделирования не ограничивается построением литолого-стратиграфических моделей геологических объектов. Система может быть эффективно использована при визуализации и анализе результатов интерпретации данных любых площадных геолого-геофизических исследований при условии, что эти результаты представляют собой распределение какого-либо геологического или геофизического параметра по вертикали. В частности, не представляет трудностей создание информативно-насыщенной объемной цифровой геоэлектрической модели геологической среды по данным интерпретации материалов электрических зондирований. Несомненный практический эффект сулит применение методики трехмерного моделирования в процессе интерпретации результатов исследований многими методами скважинной геофизики (в частности - радиоволнового и акустического просвечивания, вертикального сейсмического профилирования, трехкомпонентной скважинной магниторазведки и пр.). Объемное отображение данных подобных около- и межскважинных геофизических исследований облегчает их анализ на предварительной стадии обработки и способствует наиболее полной реализации заключенной в них информации, в том числе и путем трехмерного представления материалов окончательной интерпретации. Данная система может быть с успехом использована при обработке и отображении результатов гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических исследований. Конечно, вышеперечисленные области применения системы объемного компьютерного моделирования DGMS-3D отнюдь не исчерпывают возможные сферы ее эффективного применения.



**Рис. 3. Трехмерная модель домезозойских отложений, дополненная разрезом вышележащих меловых и кайнозойских пород.**

В заключение необходимо отметить, что система DGMS-3D проектируется максимально открытой, допускающей наиболее полную адаптацию к конкретным информационным средам, геологическим условиям и решаемым задачам. Причем отдельные модули системы разрабатывались или разрабатываются как автономные. Подобный подход дает возможность применять значительное число модулей в отрыве от системы как единого целого, для решения более узких задач, или же встраивать их в уже имеющиеся системы обработки геолого-геофизической информации. К таким автономным элементам системы относится программный модуль ZENIT, предназначенный для построения трехмерных моделей скважин по данным их инклинометрии [5,6]. Он позволяет определять действительное положение любой точки на оси скважины в произвольно выбираемой системе координат и визуализировать траекторию скважины, как в трехмерном виде, так и в любой проекции. Одна из версий модуля (ZENIT 1.2) дополнена специально разработанным интерфейсом, предназначенным для проводки наклонной (или горизонтальной) скважины при ее наведении на какую-либо цель, в качестве которой могут выступать продуктивный нефтегазоносный пласт, аварийная скважина, рудное тело или любые иные объекты [7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аронов В.И. Методика построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ. -М., 1990. -301с.
2. Глазнев В.В. Система для создания трехмерных моделей геологических объектов // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1999. -№8. -С.205-207.
3. Денисов С.Б. Системы моделирования месторождений и их роль в процессах освоения и разработки месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. -1998. -№1. -С.14-19.
4. Проектирование разработки нефтяных месторождений с использованием постоянно действующих геолого-технологических моделей / С.А.Жданов, М.М.Максимов, А.Я.Хавкин и др. // Нефтяное хозяйство. -1997. -№3. -С.33-36.
5. Аузин А.А., Глазнев В.В. Некоторые проблемы реализации данных инклинометрии скважин // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1998. -№5. -С. 241-243.
6. Глазнев В.В. Результаты тестирования программы для обработки данных инклинометрии // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1998. -№6. -С. 247-249.
7. Аузин А.А., Глазнев В.В. Современная технология проектирования и построения траекторий скважин наклонно-направленного бурения // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. -2000. -№3(9). -С. 249-251.