

УДК 551.462, 551.46.072

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

© А.И. Гончар, С.И. Неверова, А.И. Шундель, Л.И. Шлычек, 2010

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

У статті розглянуті основні аспекти, пов'язані із процесом комп'ютерного моделювання геофізичних полів геологічних структур. Наведена блок-схема розробленої системи тривимірного моделювання геологічної структури. Представлені змодельовані тривимірні моделі дна з різними включеннями.

В статье рассмотрены основные аспекты, связанные с процессом компьютерного моделирования геофизических полей геологических структур. Приведена блок-схема разработанной системы трёхмерного моделирования геологической структуры. Представлены смоделированные трёхмерные модели дна с различными включениями.

Main aspects of computer simulation of geophysical fields of geological structures are considered in the paper. Flow-chart of designed system of 3D-modelling of geological structure is outlined. Simulated three-dimensional bottom models with various inclusions are presented.

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ, ДОННЫЕ ОСАДКИ

Моделирование, как одно из эффективных средств познания закономерностей существования и развития самых различных объектов, широко применяется как в гидроакустике, так и в геологии. Геологический словарь приводит определение модели как абстрактного или вещественного отображения объектов или процессов, адекватного исследуемым объектам (процессам) в отношении некоторых заданных критериев [1, 2]. Максимальной универсальностью и функциональностью обладают математические модели, которые к настоящему времени становятся преобладающими, чему в немалой степени способствует современный уровень развития и доступность мощных средств вычислительной техники.

В геологической практике под математической моделью обычно понимают приближенное описание с помощью математических символов какого-либо геологического объекта, явления или процесса, содержащее в себе его свойства, существенные для конкретных целей моделирования, и, в пределах данных целей, способное заменить реальные объекты, явления или процессы при их изучении. В предлагаемом определении отражается тот очевидный факт, что при любом моделировании, в том числе и математическом, невозможно полномасштабное описание свойств изучаемого объекта, поэтому в описание включаются лишь некоторые, наиболее важные на данном этапе моделирования свойства природных геологических объектов (например, плотность, скорость звука, затухание и др.). Определение таких свойств - не всегда просто решаемая задача и она требует отдельного рассмотрения [3].

Высокая эффективность использования объемных моделей, которые могут быть физическими или математическими, обусловлена тем, что они, кроме хорошей наглядности и информативности, имеют большой прогностический потенциал (с определенной долей условности к классу объемных в некоторых случаях относят и блок-диаграммы, которые

являются геометрическими моделями) [4]. Опыт моделирования геологических объектов, накопленный в последние годы, свидетельствует, что по целому ряду причин наибольшую прикладную эффективность имеют компьютерные математические трехмерные модели [5-11]. Среди этих причин не последнее место занимает то обстоятельство, что в процессе создания подобных моделей достигается максимально полная и адекватная содержанию реализация и последующее хранение имеющейся геолого-геофизической информации. Практическое использование математических компьютерных моделей дает возможность относительно легко осуществить процесс непрерывного моделирования, призванного отражать развитие во времени любого поддающегося математическому описанию геологического процесса или явления.

Моделирование в большинстве случаев достаточно длительный итерационный процесс и наиболее приемлемая математическая модель отбирается исходя из условия, насколько корректно она отображает выбранные для моделирования свойства объекта-оригинала. Поскольку знания о строении изучаемого объекта не могут быть исчерпывающими и, соответственно, представления о его строении носят вероятностный характер, то достигнуть полной идентичности модели оригиналу невозможно в принципе. В подобной ситуации с большим основанием можно говорить об адекватности математической модели. На практике далеко не всегда удается достигнуть хорошего соответствия модели даже существенно упрощенным представлениям о строении оригинала, поэтому неизбежен определенный, в каждом случае строго индивидуальный, компромисс между имеющимся на конкретный момент времени пониманием геологической обстановки на объекте моделирования и геолого-математическим воплощением последнего. С другой стороны, в подобной ситуации, когда степень соответствия априорных представлений о свойствах объекта моделирования реальной геологической обстановке зависит не только от сложности его геологического строения, но и от таких субъективных факторов, как детальность имеющейся геологической информации, профессиональная подготовка и интеллект исследователя, эти априорные представления не следует абсолютизировать. В этой связи можно заметить, что сама по себе работа по формированию математической объемной модели, конечно при наличии возможности полноценной компьютерной визуализации как промежуточных, так и окончательных результатов, способна изменить первоначально существовавшие представления о геологическом строении исследуемого объекта. Трехмерная модель, даже весьма схематичная и недостаточно информационно обоснованная, дает в руки исследователю качественно иное отображение всей совокупности привлеченной для ее создания информации.

Программные средства моделирования должны удовлетворять таким требованиям как технологичность, достаточная полнота и завершенность программного обеспечения, нескритичность к формам представления исходной информации и удобство решения прикладных задач. Эти средства должны позволять использовать различные виды геолого-геофизической и другой информации вне зависимости от ее объемов, в том числе и начиная с самых минимальных, отвечающих обычно начальной стадии создания модели. Кроме того, с практической точки зрения чрезвычайно важно, чтобы двухмерные представления трехмерных моделей могли быть представлены на бумажных носителях информации в стандартной форме. С технической стороны при реализации программного обеспечения к аппаратной части не должно предъявляться излишне жестких требований, а возможно

большее число процедур, и, прежде всего, процесс визуализации, могли быть реализованы максимально доступными средствами, желательно встроенными в стандартное программное обеспечение Windows.

Ориентируясь на вышесказанное, нами была разработана система компьютерного трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур, блок-схема которой показана на рис. 1.



Рис. 1 – Блок-схема создания математических моделей геологических структур

Рассмотрим общие принципы моделирования реальных донных структур, характеризующихся в большей или меньшей степени слоистостью, морфологией, а также случайными (флуктуации свойств) и детерминированными (локализованными) неоднородностями.

Можно выделить два класса модельных представлений структурированной среды [12]. В первом случае среда представляется системой границ между областями с заданными

характеристиками. Во втором, более общем случае, распределение свойств среды представляется произвольной функцией координат в исследуемом объеме среды. Такие модели можно определить как дискретные и непрерывные соответственно.

Пусть в системе координат (x, y, z) задана область $V = X \times Y \times Z$ донной структуры. Каждый элемент $dv \in V$ дна характеризуется совокупностью $\Psi(dv) = \{\rho, \varphi, \lambda, \mu, \dots\}$ взаимосвязанных свойств, например, плотностью ρ , пористостью φ , упругими постоянными Ламе λ и μ и т.д. Ищется метод, конструирующий массив значений $\Psi(dv \in V)$, отвечающих с необходимой степенью точности реальной донной структуре.

Пусть в области V осадочной толщи выделяются $K+1$ структурных состояний Ψ_k ($k = 0..K$), соответствующих водной среде (Ψ_0) и слоям дна ($\Psi_{1..K}$). Соответствующие состояниям Ψ_k горизонтально протяженные области (возможно, многосвязные) $\Omega_k \in V$ называются k -доменами. Области Ω_k в данном случае являются элементами донной структуры.

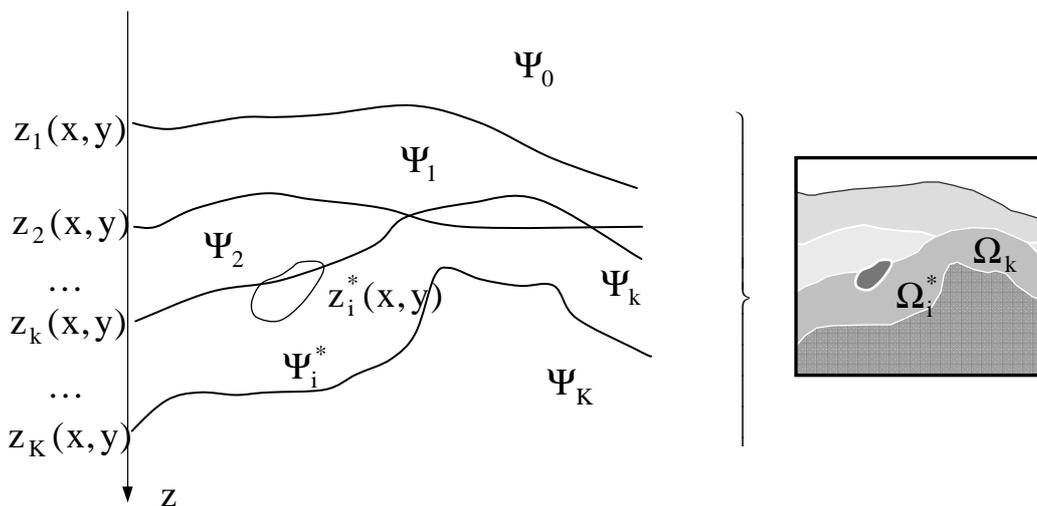


Рис. 2 - Моделирование дискретной донной структуры с локализованной неоднородностью

Для дискретного ряда состояний Ψ_s вводится упорядоченная последовательность поверхностей $z_k(x, y)$, образующих донные горизонты. Функции $z_k(x, y)$ удобно задавать в следующей форме:

$$z_k(x, y) = z_k^0 + \delta z_k(x, y) = z_k^0 + F_2^{-1}[C_k(f_x, f_y)]; \quad (1)$$

где z_k^0 - средние уровни залегания горизонтов z_k ;

δz_k - отклонения горизонтов z_k от средних уровней z_k^0 , причем эти отклонения определяются путем обратного двухмерного Фурье-преобразования (F_2^{-1}) собственных пространственных спектров $C_k(f_x, f_y)$.

Значения z_k^0 формально являются нулевыми членами Фурье-разложений образующих поверхностей z_k , однако вынесены из спектров C_k в силу того, что обычно $z_k^0 \gg \delta z_k$ и $z_k^0 \gg F_2^{-1}[C_k(0,0)]$.

Пространственные спектры $C_k(f_x, f_y)$ определяют морфологические особенности горизонтов z_k , включая крупные неровности горизонтов (f_x и f_y малы) и их малоразмерную стохастическую «шероховатость» (f_x и f_y велики). При $C_k(f_x, f_y) = 0$ получаем морфологически вырожденные плоские горизонты, залегающие на глубинах z_k^0 . Поэтому в такой модели все формы поверхностного и внутреннего рельефа донной структуры могут рассматриваться в качестве возмущений идеально компланарной слоистой структуры. Если считать, что морфологию внутренней структуры дна задает, как правило, более плотная подложка (горизонт z_k), то пространственные спектры C_k следует определять рекурсивно:

$$C_{k-1} = C_k + \varepsilon_k, \quad (2)$$

где функции $\varepsilon_k(f_x, f_y)$ выражают степень корреляции формы смежных горизонтов.

При $\varepsilon_k(f_x, f_y) = 0$ соседние горизонты будут иметь одинаковую форму, что позволяет описывать «наследование» формы внутренних горизонтов донной структуры, обусловленное их общим генезисом. Топологическая связность донных слоев определяется функциями $\varepsilon_k(f_x, f_y)$. Действительно, случайные отклонения $\varepsilon_k(f_x, f_y)$ от нулевого значения определяют взаимное рассогласование формы горизонтов донной структуры, а значит, их возможные пересечения в пространстве. Если смежные горизонты коррелированы слабо, т.е. $\langle |\varepsilon_k(f_x, f_y)| \rangle \gg 0$, то топологическая связность слоев будет зависеть от соотношения мощностей Δz_k^0 горизонтов и величин δz_k их отклонений. В свою очередь, отклонения δz_k , как следует из (1) и (2), могут быть описаны функциями $\varepsilon_k(f_x, f_y)$.

Для генерации пространственных спектров C_k (или функций ε_k) при моделировании слоистого дна вводится двумерное нормальное случайное поле $N(\vec{f})$, реализация которого в пространстве $\vec{f} = (f_x, f_y)$ определяется средним μ и дисперсией σ . Вводится также совокупность двумерных нормальных субфильтров $f_c(\vec{f})$, описываемых выражениями:

$$f_c(\vec{f}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{cx}\sigma_{cy}\xi_c} \exp\left\{-\frac{1}{2\xi_c^2}(u_{cx}^2 - 2\rho_c u_{cx}u_{cy} + u_{cy}^2)\right\}, \quad (3)$$

$$\xi_c = \sqrt{1 - \rho_c^2}, \quad u_{cx} = \frac{f_x - \mu_{cx}}{\sigma_{cx}}, \quad u_{cy} = \frac{f_y - \mu_{cy}}{\sigma_{cy}}; \quad \sigma_{cx} > 0, \quad \sigma_{cy} > 0, \quad |\rho_c| \leq 1,$$

и образующих фильтр $F(\vec{f})$ вида:

$$F(\vec{f}) = \sum w_c f_c(\vec{f}), \quad (4)$$

где $w_c > 0$ - веса субфильтров.

Каждый субфильтр $f_c(\vec{f})$ вида (3) позволяет описывать квазислучайные структурные элементы одного пространственного масштаба, зависящего от параметров $\vec{\mu}_c = (\mu_{cx}, \mu_{cy})$ и $\vec{\sigma}_c = (\sigma_{cx}, \sigma_{cy})$. Все нормальные субфильтры таковы, что

$$\int_{R^2} f_c(\vec{f}) d\vec{f} = 1, \quad (5)$$

поэтому

$$\int_{R^2} F(\vec{f}) d\vec{f} = \sum w_c. \quad (6)$$

Пространственные спектры $C_k(\vec{f})$ горизонтов z_k слоистой донной структуры считаются результатом фильтрации $F(\vec{f})$ случайного поля $N(\vec{f})$, определяемые следующим образом:

$$C_k(f_x, f_y) = C_k(\vec{f}) = F(\vec{f}) \cdot |N(\vec{f})|. \quad (7)$$

Рассмотрим теперь один из возможных способов композиции синтезированных горизонтов z_k в донную структуру, т.е. способов определения свойств любого из элементов dv слоистого дна по заданным функциям z_k .

Считается, что элемент $dv \in V$ осадочной толщи принадлежит домену Ω_k (т.е. $\Psi(dv) = \Psi_k$), если он расположен под образующей z_k (т.е. $z > z_k$) и над всеми образующими $z_{q>k}$ (т.е. $z < z_{q>k}$). Для этого свойства элементов донной структуры записываются функцией вида:

$$\Psi(x, y, z) = \sum \Psi_k g_k(x, y, z), \quad (8)$$

где $g_k(x, y, z)$ - так называемый генератор донной структуры (метод композиции структурных элементов), имеющий в данном примере вид:

$$g_k(x, y, z) = \begin{cases} 1, & z \in [z_k, z_{q>k}) \\ 0, & z \notin [z_k, z_{q>k}) \end{cases} \quad (9)$$

Использование для описания условий $z - z_k \geq 0$ и $z_{q>k} - z > 0$ единичных функций $U_-(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi \geq 0 \\ 0, & \xi < 0 \end{cases}$ и $U_+(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi > 0 \\ 0, & \xi \leq 0 \end{cases}$ дает следующее представление генератора донной структуры:

$$g_k(x, y, z) = U_-(z - z_k) \prod_{q>k} U_+(z_q - z). \quad (10)$$

Тогда свойства элементов осадочной толщи описываются функцией:

$$\Psi(x, y, z) = \sum_k \Psi_k U_-(z - z_k) \prod_{q>k} U_+(z_q - z). \quad (11)$$

Поверхность рельефной и неоднородной осадочной толщи со всеми ее морфологическими и структурными особенностями формально является верхней границей нулевого домена и определяется выражением:

$$\begin{cases} \Psi(x, y, z) = \Psi_0 \\ \Psi(x, y, z + dz) \neq \Psi_0 \end{cases} \text{ или } \begin{cases} \Psi = \Psi_0 \\ \partial\Psi/\partial z \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Необходимо отметить, что не существует теоретических ограничений на порядок (количество слоев K) и морфологическую детализацию (верхние частоты спектров C_k) моделируемой дискретной донной структуры.

Неоднородности, локализованные в слоистой донной структуре, можно моделировать в виде i -доменов Ω_i^* , обладающих свойствами Ψ_i^* и ограниченных замкнутыми поверхностями $z_i^*(x, y)$.

Структура слоистого дна, содержащего множество локализованных неоднородностей, описывается следующим выражением:

$$\Psi(\vec{r}) = \begin{cases} \sum \Psi_k g_k(\vec{r}), & \vec{r} \in V \setminus \bigcup_i \Omega_i^* \\ \Psi_i^*, & \vec{r} \in \Omega_i^* \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, при моделировании дискретной (стратифицированной) донной структуры выделяются K структурных состояний Ψ_k , которым соответствуют протяженные и, в общем случае, многосвязные области (домены) Ω_k . Для дискретного ряда состояний Ψ_k

вводится упорядоченная последовательность поверхностей $z_k(x, y)$, образующих донные горизонты (состояния могут повторяться в направлении седиментации). Разномасштабные морфологические особенности горизонтов z_k определяются их пространственными спектрами $C_k(f_x, f_y)$. Если генеральную морфологию структуры дна задает подложка (скалистое основание), то спектры вышележащих горизонтов могут быть определены рекурсивно. Дискретная донная структура описывается функцией вида $\Psi(\vec{r}) = \sum \Psi_k g_k(\vec{r})$, где $g_k(\vec{r})$ - т.н. генератор структуры, определяющий способ формирования k -доменов Ω_k . Порядок (количество K состояний Ψ_k) и степень морфологической детализации (размер ненулевой области в спектрах C_k) моделируемой дискретной донной структуры могут быть заданы произвольно большими.

Пример, иллюстрирующий построение дискретной структурно-акустической модели дна с помощью изложенных концепций, показан на рис. 3.

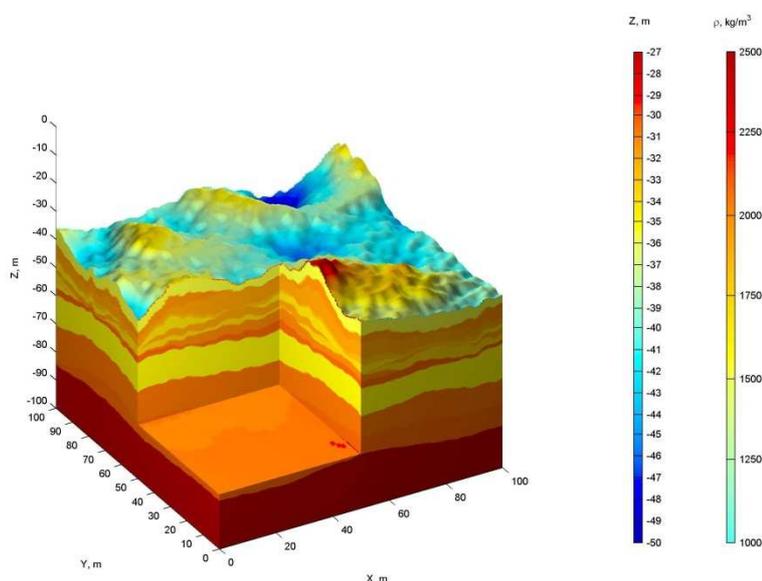


Рис. 3 – Дискретная структурно-акустическая модель, синтезированная в области $100 \times 100 \times 100$ м (дискретизация $1 \times 1 \times 0.2$ м); 16 состояний в виде коррелированных слоев с различной плотностью, распределение плотностей $\rho(x, y, z)$ элементов модели и рельеф $Z(x, y)$

Синтез моделей проводился в среде Matlab Version 7.9.0.529(R2009b) с помощью специализированных script-функций и GUI-оболочки. Для последующего использования синтезированной модели сохранялись пространственные спектры её структурных элементов. Для полного решения вопроса оптимизации необходимы масштабные численные эксперименты и доводка алгоритмов синтеза пространственных распределений акустических свойств элементов моделируемых сред.

Процесс создания математических моделей геофизических полей геологических структур описан в [13]. Данный программный комплекс позволяет создавать модели дна, содержащие включения полезных ископаемых различной формы и состава, в том числе углеводородное сырьё (рис. 4-6).

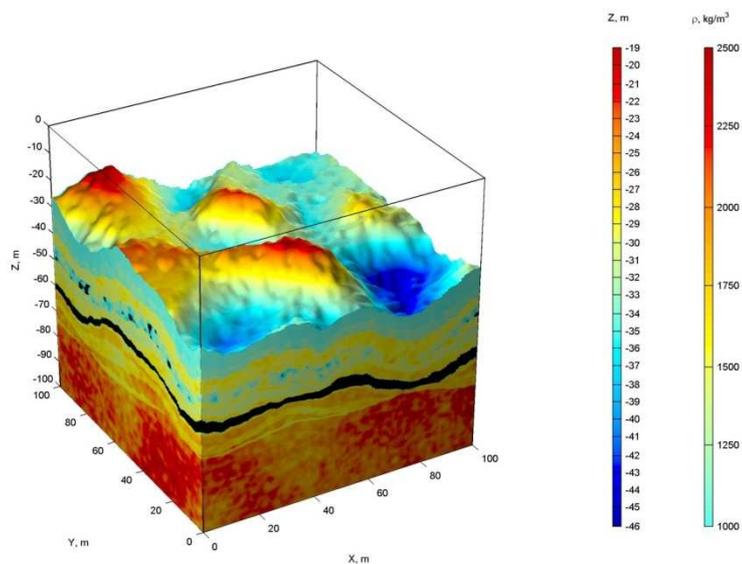


Рис. 4 – Модель дна, содержащая включение в виде пласта

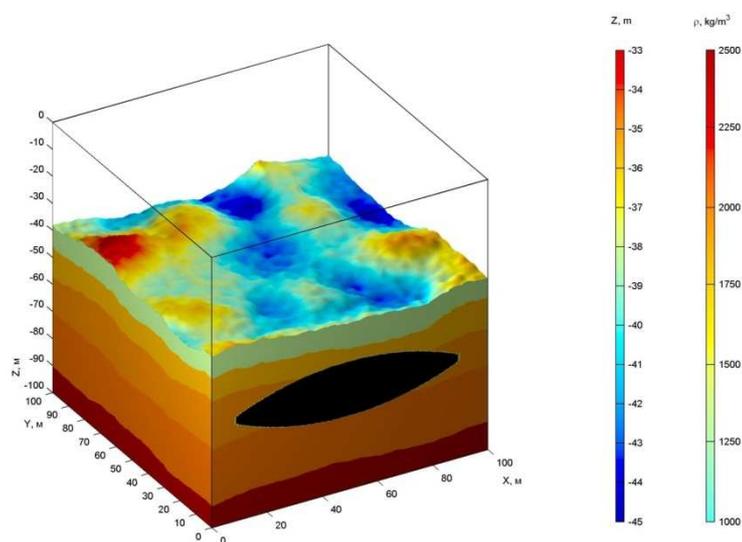


Рис. 5 – Модель дна, содержащая включение в виде ограниченного пласта

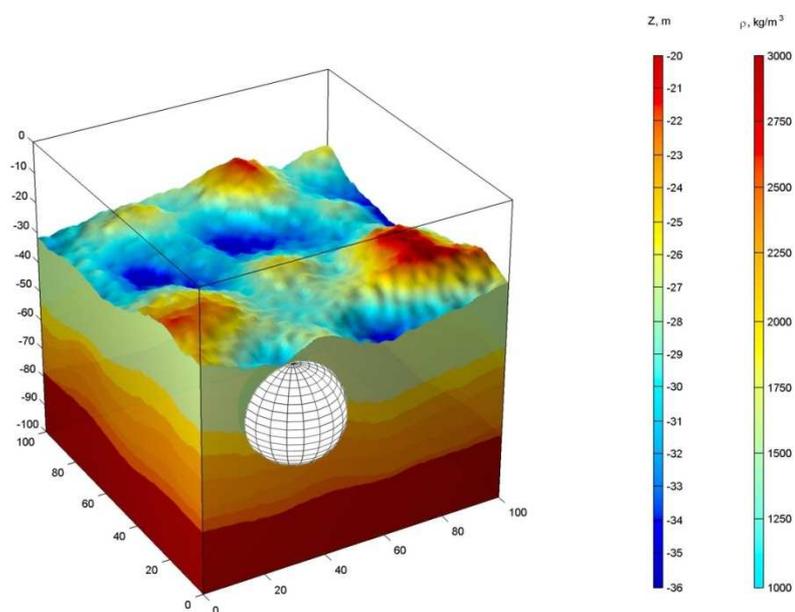


Рис. 6 – Модель дна, содержащая включение сферического типа

Система позволяет осуществлять создание объемных структурных литолого-стратиграфических или иных моделей геологических сред с преимущественно субгоризонтально-слоистым строением, в том числе и при наличии выклинивания пластов. При этом возможен расчет и визуализация неограниченного числа вертикальных и горизонтальных разрезов созданной модели (рис. 7).

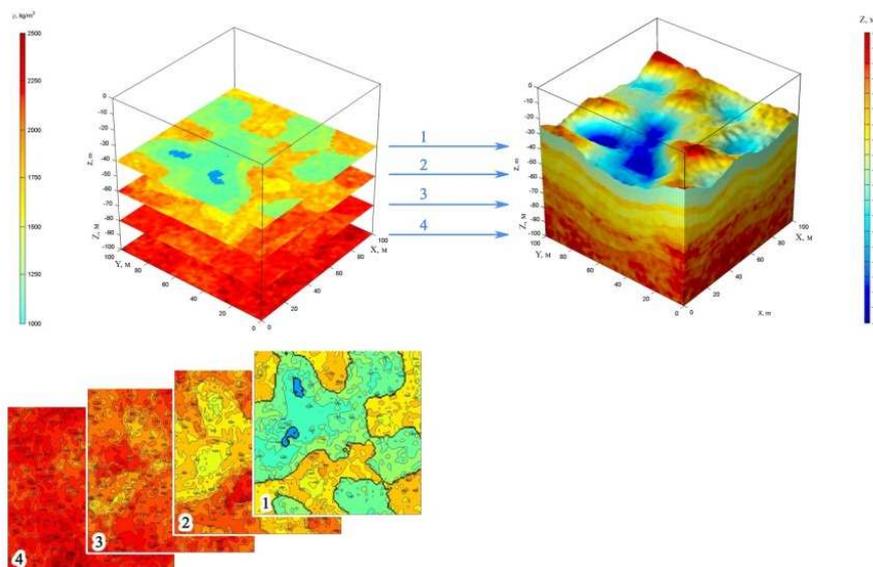


Рис. 7 – Модель геологической структуры дна и её горизонтальные сечения

Созданные трёхмерные модели необходимы для моделирования панорамной съемки (работы ГБО, ГБО с интерферометрическим каналом, многолучевого эхолота), трёхмерного профилирования, построения изобатических карт по результатам эхолотных промеров.

При моделировании процесса профилирования донных структур целесообразнее использовать не трёхмерные модели геологических структур, а двумерные (плоский вертикальный срез трехмерной структуры).

Разработанная система моделирования может найти применение не только при решении вышперечисленных задач. На ее основе могут быть разработаны другие программные средства, позволяющие вести мониторинг отработки месторождений полезных ископаемых, решать вопросы оптимизации оперативного планирования на горнодобывающих предприятиях на основе эффективного контроля структуры запасов обрабатываемых месторождений, определять приоритетные направления эксплуатационного и разведочного бурения и тому подобное.

Данная модель может быть дополнена соответствующим программным обеспечением и обеспечивать поиск и обнаружение технических объектов, в т.ч. малоразмерных.

Литература

1. Аузин А.А., Глазнев В.В. Компьютерное геолого-математическое моделирование: проблемы и возможности // Вест. Воронеж. университета. Геология, вып. 11, – 2001. – с. 199-204

2. Геологический словарь. Т.1. -М., 1973. -486 с.
3. Каждан А.Б., Гусков О.И., Шиманский А.А. Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых. - М., 1979. -168с.
4. Бурде А.И. Теоретические основы и способы определения комплекса методов при региональных геологосъемочных и поисковых работах. -Л., 1978. -143 с.
5. Аузин А.А., Глазнев В.В. Разработка трехмерных компьютерных моделей геологических сред // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -2000. -№5(10). -С. 177-182.
6. Денисов С.Б. Системы моделирования месторождений и их роль в процессах освоения и разработки месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. -1998. -№1. -С. 14-19.
7. 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
8. Аронов В.И. Трехмерная аппроксимация как проблема обработки, моделирования и интерпретации геофизических и геологических данных // Геофизика. -2000. -№4. -С. 21-25
9. Аузин А.А., Глазнев В.В. Объемные цифровые модели геологических объектов и некоторые проблемы их создания // Геофизика. -2000. -№5. -С. 40-43
10. Сильвестер И.Ф., ОХеарн Т., Хсу Х., Эллиот С. Гигантское месторождение Карачаганак - реализация его потенциала // Нефтяное обозрение. -1998. -С. 4-15
11. Шелепов В.В., Галимзянов Р.М., Парфенов Б.В., Басик Е.П. Рабочая модель Повховского месторождения с целью определения запасов нефти // Нефтяное обозрение. -1998. -С. 52-61
12. Кобрунов А.И. Параметризация в математических моделях геологических сред при решении обратных задач // Геофизический журнал – 2001. – 23, № 5. – С. 3-12
13. Создание теоретических основ и методологии моделирования гидроакустических полей геологических структур: Отчет по НИР/ НТЦ ПАС НАН Украины; № ГР 0106U000108. Запорожье, 2010. – 105 с.