

УДК 543.27, 621.384.3

А.И.Гончар, А.И.Шундель С.Г.Федосеенков

*Научно-технический центр
панорамных акустических систем НАН Украины, г.Запорожье***НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ
НЕОДНОРОДНОГО СЛОИСТОГО ДНА**

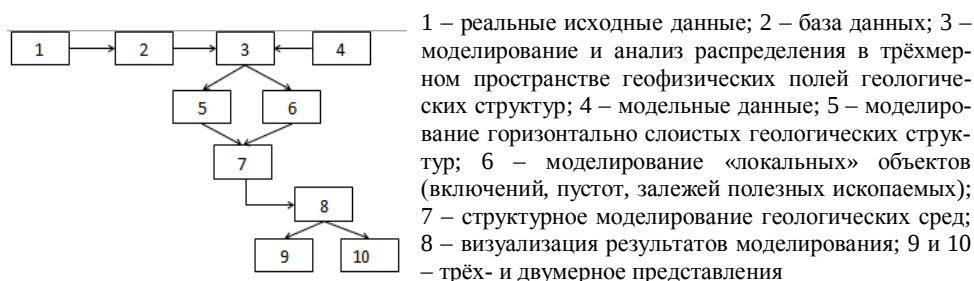
Описана разработанная система компьютерного трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур. Выполнено математическое моделирование геологической среды, приближенной к реальной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морское дно, неоднородные среды, математическое моделирование, преобразование Фурье, геологическая среда.

Моделирование, как одно из эффективных средств познания закономерностей существования и развития самых различных объектов, широко применяется в гидрогеоакустике. 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.

Высокая эффективность использования объемных моделей, которые могут быть физическими или математическими, обусловлена тем, что они, кроме хорошей наглядности и информативности, имеют большой прогностический потенциал [1]. Опыт моделирования геологических объектов, накопленный в последние годы, свидетельствует, что по целому ряду причин наибольшую прикладную эффективность имеют компьютерные математические трехмерные модели. 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. Ориентируясь на вышесказанное, разработана система компьютерного трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур, блок-схема которой показана на рис.1.

Данный программный комплекс позволяет создавать модели дна, содер-



Р и с . 1. Блок-схема программного комплекса трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур.

© А.И.Гончар, А.И.Шундель С.Г.Федосеенков, 2013

жащего включения полезных ископаемых различной формы и состава, в том числе углеводородное сырьё.

Как видно из блок-схемы, представленной на рис.1, для создания математических моделей могут использоваться как реальные данные о геологической среде, так и модельные данные. В зависимости от типа исходных данных используются различные методы моделирования геологической среды.

Подробно общие принципы моделирования реальных донных структур, характеризуемых в большей или меньшей степени слоистостью, морфологией, а также случайными (флуктуации свойств) и детерминированными (локализованными) неоднородностями рассмотрены в [2, 3].

Представим среду системой границ между областями с заданными характеристиками. Такие модели можно определить как дискретные. Рассмотрим построение дискретной модели донной структуры.

Каждый элемент дна характеризуется совокупностью $\Psi(\vec{r}) = \{\rho, \varphi, \lambda, \mu, \dots\}$ взаимосвязанных свойств, например, плотностью ρ , пористостью φ , упругими постоянными Ламе λ и μ и т.д. Найдем метод, конструирующий массив значений $\Psi(\vec{r})$, отвечающих с необходимой степенью точности реальной донной структуре. Пусть в области осадочной толщи выделяются $K + 1$ структурных состояний Ψ_k ($k = 0 \dots K$), соответствующих водной среде (Ψ_0) и слоям дна ($\Psi_{1 \dots K}$).

Для дискретного ряда состояний Ψ_k введем упорядоченную 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 ; $C_k(f_x, f_y)$ – пространственный спектр отклонений δz_k .

Отклонения δz_k определяются путем обратного двумерного Фурье-преобразования (F_2^{-1}) собственных пространственных спектров $C_k(f_x, f_y)$.

Значения z_k^0 формально являются нулевыми членами Фурье-разложения 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.

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

$$C_k(f_x, f_y) = C_k(\vec{f}) \cdot F(\vec{f}) \cdot |N(\vec{f})|. \quad (2)$$

Тогда (1) с учетом (2) можно переписать в виде:

$$z_k(\vec{r}) = z_k^0 + \iint |N(\vec{f})| \sum \frac{w_c}{2\pi\sigma_{cx}\sigma_{cy}\xi_c} \exp\left\{-\frac{1}{2\xi_c^2}(u_{cx}^2 - 2\rho_c u_{cx}u_{cy} + u_{cy}^2)\right\} e^{i2\pi\vec{f}\vec{r}} d\vec{f} \quad (3)$$

Рассмотрим теперь один из возможных способов композиции синтезированных горизонтов z_k в донную структуру, т.е. способов определения свойств любого из элементов слоистого дна по заданным функциям z_k . Будем считать, что элемент осадочной толщи принадлежит домену структурному состоянию Ψ_k (т.е. $\Psi(x, y, z) = \Psi_k$), 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 представим свойства элементов донной структуры функцией вида: $\Psi(x, y, z) = \sum \Psi_k g_k(x, y, z)$, где $g_k(x, y, z)$ – так называемый генератор донной структуры (метод композиции структурных элементов), имеющий в данном примере вид:

$$g_k(x, y, z) = \begin{cases} 1, & z \in [z_k, z_{q>k}) \\ 0, & z \notin [z_k, z_{q>k}) \end{cases} \quad (4)$$

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

$$\begin{cases} \Psi(x, y, z) = \Psi_0 \\ \Psi(x, y, z + dz) \neq \Psi_0 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \Psi = \Psi_0 \\ \partial\P/\partial z \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

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 объемных тел Ω_i^* , ограниченных замкнутыми поверхностями $z_i^*(x, y)$, обладающих свойствами Ψ_i^* . Структура слоистого дна, содержащего множество локализованных неоднородностей, будет описываться следующим выражением:

$$\Psi(\vec{r}) = \begin{cases} \sum \Psi_k g_k(\vec{r}), & \vec{r} \in V \setminus \bigcup_i \Omega_i^* \\ \Psi_i^*, & \vec{r} \in \Omega_i^* \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, при моделировании дискретной (стратифицированной) донной структуры выделяются K структурных состояний Ψ_k , которым соответствуют протяженные и, в общем случае, многосвязные области. 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 $\Psi(\vec{r}) = \sum \Psi_k g_k(\vec{r})$. Порядок (количество K состояний Ψ_k) и степень морфо-

Т а б л и ц а 1. Механико-акустические свойства морских осадков.

тип грунта	плотность, г/см^3	скорость звука, км/с	затухание, дБ/км Гц
ил	1,1 – 1,9	1,41 – 1,5	0,05 – 0,9
глины	1,5 – 1,98	1,4 – 1,6	0,2 – 0,61
пески	1,83 – 2,11	1,515 – 1,6	0,4 – 0,7
гравий	2,05 – 2,3	1,55 – 1,65	0,9
выходы скальных пород	2,35 – 2,9	3,1 – 6,6	0,4 – 0,5

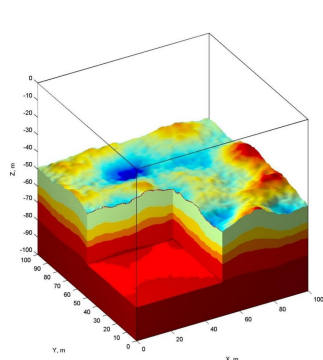
логической детализации (размер ненулевой области в спектрах C_k) моделируемой дискретной донной структуры могут быть заданы произвольно большими.

Выполним расчет математических моделей геологических структур, приближенных к реальным, предложенным выше способом. Исходные данные для модели среды приведе-

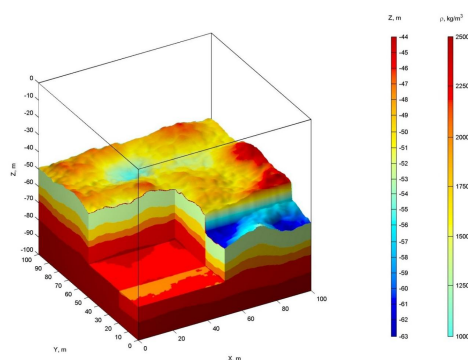
ны в табл.1.

Результаты расчётов представлены на рис.2 – 5.

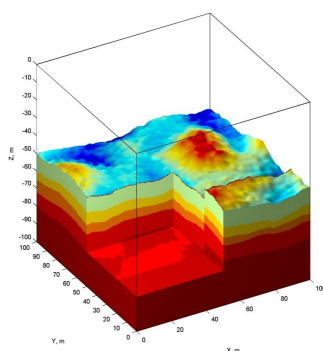
Разработанная система компьютерного трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур позволяет осуществлять создание объемных структурных литолого-стратиграфических или иных моделей геологических сред с преимущественно субгоризонтально-слоистым



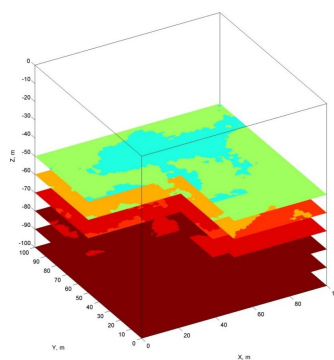
Р и с . 2. Дискретная структурно-акустическая модель, синтезированная в области $100 \times 100 \times 100$ м (дискретизация $1 \times 1 \times 0,2$ м); 5 состояний в виде коррелированных слоев с параметрами из табл.1.



Р и с . 3. Математическая модель геологической среды с параметрами из табл.1, приближенной к реальной, с геологическим нарушением сброс.



Р и с . 4. Математическая модель гео-



Р и с . 5. Горизонтальные сечения ма-

логической среды с параметрами из табл.1, приближенной к реальной, с геологическим нарушением взброс.

тематической модели геологической среды морского дна с параметрами из табл.1.

строением, в том числе и при наличии выклинивания пластов. При этом возможен расчет и визуализация неограниченного числа вертикальных и горизонтальных разрезов созданной модели [4 – 5].

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бурде А.И.* Теоретические основы и способы определения комплекса методов при региональных геологосъемочных и поисковых работах. – Л., 1978. – 143 с.
2. *Математическое моделирование слоистых неоднородных сред с полостями простой и сложной формы:* Отчет по НИР / НТЦ ПАС НАН Украины; № ГР 01040008326. – Запорожье, 2004. – 151 с.
3. *Развитие математических моделей геологических структур, приближенных к реальной среде.* Развитие алгоритмов и программного обеспечения исследования донных структур гидрогеоакустическими средствами: Отчет по НИР / НТЦ ПАС НАН Украины; № ГР0112U001874. – Запорожье, 2012. – 106 с.
4. *Гончар А.И., Неверова С.И., Шундель А.И., Шлычек Л.И.* Создание системы компьютерного трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби дослідження світового океану). – Запоріжжя, 2010. – вип.7. – С.90-100.
5. *Гончар А.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И., Писанко И.Н.* Создание структурно-акустических моделей морского дна // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби дослідження світового океану). – Запоріжжя, 2004. – вип.1. – С.13-21.

Материал поступил в редакцию 13.06.2013 г.

АНОТАЦІЯ Описана розроблена система комп'ютерного тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур. Виконане математичне моделювання геологічного середовища, наближеного до реального.

ABSTRACT This article describes a developed system a three-dimensional computer modeling of geophysical fields of geological structures. The mathematical modeling of the geological environment, close to actual.