

УДК 551.462; 551.46.072

СИНТЕЗ СТРУКТУРНО-АКУСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МОРСКОГО ДНА

А.И. Гончар, С.И. Донченко, Л.И. Шлычек, А.И. Шундель
*Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины,
г. Запорожье, ул. Чубанова, 1, E-mail: cpas@zr.ukrtel.net*

Разработана совокупность аналитико-численных методов математического моделирования структуры и пространственного распределения акустических свойств морского дна, учитывающих слоистость, геологическую структурированность донных отложений, наличие в грунтах полостей и включений разной формы и свойств.

Розроблена сукупність аналітико-чисельних методів математичного моделювання структури і просторового розподілу акустичних властивостей морського дна, які враховують шаруватість, геологічну структурированість донних відкладень, наявність у грунтах порожнин і включень різних форм та властивостей.

The system of analytic numerical methods of mathematical simulation of sea bottom structure and spatial distribution of acoustic properties is developed, taking into account layering, geological structuredness of bottom sediments, the presence of loculi or other different kind of forms and characteristics enclosures.

Задача изучения структуры верхней толщи морского дна (первые десятки и сотни метров донных отложений) решается с применением современных цифровых систем профилирования и стратификации [1, 2]. Постановка ряда новых проблем, связанных с освоением сырьевых ресурсов шельфа и мониторингом сейсмогенерирующих структур (Русско-Украинский проект), требует привлечения новейших средств математического моделирования неоднородных донных структур, а также средств системного анализа [3]. Эти средства в процессе разработки систем профилирования позволяют решать задачи:

- повышения эффективности систем профилирования (увеличение эффективной глубины профилирования и повышение разрешающей способности за счет использования параметрического эффекта и сложных зондирующих импульсов и т.п.);
- развития алгоритмов реконструкции внутренней структуры дна по особенностям его отклика на заданное внешнее воздействие;
- развития аппаратно-программных реализаций систем профилирования (приемо-передающих трактов, алгоритмов управления и обработки поступающей информации).

При этом определение особенностей поля отклика модельной донной структуры и соотнесение с этими особенностями отдельных ее элементов (слоев, полостей, включений) является первоочередной и актуальной задачей. Решение этой задачи требует создания развитых структурно-акустических моделей дна, учитывающих слоистость, флюидо- и газонасыщенность грунтов, наличие в грунтах пор, полостей, включений различной формы и свойств.

Для дна как сложной физической системы строится и исследуется идеализированная модель, адекватно отражающая основные особенности его структуры и динамики. Объясняется это тем, что моделирование (как замена сложных реальных особенностей системы приближенными идеальными) позволяет значительно упростить теоретический анализ. Создаваемые модели должны допускать возможность своей модификации без существенной перестройки аналитической основы. Необходимость учета все более тонких физических эффектов (в том числе резонансных), присущих природным системам, требует

от моделей достаточной гибкости, позволяющей вводить новые структурные элементы, среды и объекты, изменять топологию и размерность моделей.

Акустические свойства и конфигурация реальных донных структур могут быть весьма разнообразны. Форма и размеры локализованных или распределенных структурных элементов, топология и природа донных слоев, расположение компактных локализованных неоднородностей относительно границ раздела сред, - все это существенно влияет на сложность соответствующих моделей и определяет характерные приемы их анализа. Дополнительные трудности вызывает необходимость пространственной постановки задачи, учета стохастического характера естественных сред (вариации свойств донных грунтов), а также анизотропный (направленность приемо-передающих антенн) и импульсный (нестационарная постановка задачи) характер акустического поля возбуждения.

Модели, для которых необходимы постановка и решение прямой и обратной задач гидроакустики, дают возможность оценивать точность реконструкции структуры профилируемой среды. Как правило, эти модели требуют аналитико-численного определения акустического поля в системе «антенна профилографа - водная толща - дно», для чего необходимо: иметь детальное математическое представление о структуре сред (структурные модели), знать особенности формирования и распространения полей (гидроакустические модели), их регистрации и обработки (системные модели).

Реальные донные структуры характеризуются развитой в большей или меньшей степени слоистостью, морфологией, а также случайными (флуктуации свойств) и относительно детерминированными (включения, полости) неоднородностями. Однородность как инвариантность свойств среды при переходе от одной ее точки к другой математически может быть выражена симметрией среды относительно координатных преобразований. Нарушение этой симметрии ассоциируется с присущими среде неоднородностями. Анализ неоднородностей при таком подходе состоит в том, чтобы связать параметры неоднородностей среды с наблюдаемыми аномалиями акустического поля. Для этого могут быть построены уравнения поля, в которые в качестве параметров среды входят параметры нарушения симметрии.

В целом можно выделить два класса модельных представлений о структурированной среде. В первом случае среда представляется системой границ между областями с заданными характеристиками (дискретная модель). Во втором, более общем случае, распределение свойств среды представляется произвольной функцией координат в исследуемом объеме среды (непрерывная модель). Изменчивую структуру реального дна сложно единообразно описать в рамках какой-либо одной модели, поэтому при анализе используются локальные структурные модели, характеризующие отдельные участки дна.

Естественная слоистая структура донных грунтов обычно моделируется компланарным пакетом сред с плоскими границами раздела. Дно в целом можно представлять импедансным, упругим или гетерогенным (модель Био) многослойным полупространством, а водную толщу – импедансным полупространством. Простые локализованные неоднородности можно считать внутренне однородными импедансными образованиями (включениями либо полостями) донной структуры. Эти объекты могут быть заглублены в подстилающее полупространство или находиться в одном из слоев донных грунтов. Ситуация значительно усложняется, если поверхность локализованной неоднородности пересекает границы раздела сред, или когда протяженный объект заглублен неравномерно. Рассмотрение сложных и более близких к реальным средам моделей дает возможность учесть при анализе те физические явления, которые определяют тонкую структуру донных эхо-сигналов. От выбора модели существенно зависит математическая сложность методов анализа моделируемой системы, а также трудоемкость и точность численных оценок. Отметим, что детальное акустическое моделирование дна с объектом,

учитывающее вязкоупругие свойства, а в отдельных случаях – гетерогенный и глубоко стохастический характер дна, для практических целей может оказаться избыточным.

Данные профилирования и эхолотных промеров могут быть использованы для создания стратиграфических и батиметрических моделей обследованных участков дна. Достаточно плотное множество экспериментальных данных позволяет восстановить рельеф участка и определить его внутреннюю структуру, однако для этого необходимо знать особенности формирования и распространения акустических полей в неоднородных средах, т.е. вводить и использовать соответствующие гидроакустические модели.

При изучении сложно структурированной среды с помощью акустических полей реальные эхо-сигналы отражают обобщенную волновую картину, в которой влияние отдельных структурных особенностей сложным образом объединено, вследствие чего трудно дать однозначную интерпретацию экспериментальных данных без привлечения физико-математических моделей сред и теоретических методов их анализа. Поэтому второй, наиболее сложный этап моделирования процесса профилирования заключается в создании модели, описывающей пространственно-временные особенности формирования и распространения акустического поля в средах с заданной структурой, и аналитико-численном определении отклика сред на внешнее воздействие.

Обычно ставится плоская (реже – пространственная) задача определения поля отклика (т.е. эхо-сигнала) смоделированной донной структуры на заданное внешнее воздействие. Часто вначале решают стационарную задачу, когда акустическое поле возбуждения представляется установившимися гармоническими колебаниями. Переход к нестационарной задаче, в которой учитывается импульсный характер зондирования дна, осуществляется без принципиальных трудностей хорошо известными методами гармонического анализа. Исследование тонкой структуры полей отклика, например, формы импульсов, резонансного характера амплитудно-частотных характеристик сред, может быть средством определения свойств донных структур и локализованных в них неоднородностей.

Строгая задача определения поля отклика дна с объектом математически формулируется следующим образом: найти решение волнового уравнения (уравнения Гельмгольца, уравнений Ламе), удовлетворяющее заданным в модели краевым условиям. Сложность решения соответствующей краевой задачи состоит в том, что границы сред обычно либо являются координатными поверхностями в разных системах координат, либо вообще не являются каноническими поверхностями. Существует целый ряд достаточно разработанных методов решения таких краевых задач: метод сведения к бесконечным системам линейных алгебраических уравнений, асимптотические методы, методы граничных и конечных элементов и другие. Выбор метода решения конкретной краевой задачи зависит от целого ряда факторов, таких как: простота построения решения в аналитическом виде, степень сходимости процесса и точность решения, простота физической интерпретации решения, возможность построения решения для пространственной постановки задачи и для моделей со сложными и, возможно, пересекающимися границами раздела сред. Существующие методы имеют, вообще говоря, пересекающиеся границы областей эффективного использования, что позволяет строить решение модельных краевых задач в довольно широком диапазоне частот и для практически любых соотношений параметров.

Исходным при теоретическом описании распространения акустического поля является гиперболическое волновое уравнение. При решении прямой задачи определяется удовлетворяющее волновому уравнению и заданным начальным и граничным условиям поле давления, создаваемое движущимся источником - антенной. В зависимости от специфики решаемой задачи дно рассматривается как импедансная, вязкоупругая (уравнения Ламе) или гетерогенная (модель Био) среда. Решение для случая произвольных нестационарных

(импульсных) воздействий на линейную среду синтезируется из решений уравнения Гельмгольца методами преобразований Фурье.

Многие методы решения волнового уравнения основываются на фундаментальных теоремах суперпозиции частных решений. Метод суперпозиции адекватно выбранной последовательности основных функций дает возможность получать решения, удовлетворяющие заданным краевым и начальным условиям, а также получать решения неоднородных уравнений. Разложения по собственным функциям и методы интегральных преобразований представляют систематические схемы для конструирования таких решений. Методы функций Грина являются суперпозиционными схемами, которые сводят решение соответствующих задач к задачам с простыми функциями источников или краевыми условиями. Кроме условий на границах, для определения поля необходимо использовать условие излучения, исключающее влияние бесконечно удаленных источников поля.

Строгий теоретический расчет отклика донной структуры, содержащей акустически взаимосвязанные разномасштабные неоднородности, требует больших аналитических усилий. Даже малые вариации акустико-структурных параметров реальных систем от модельных значений приводят к значительным отклонениям наблюдаемых откликов от расчетных. Это оправдывает приближенные методы расчета полей отклика в упрощенных моделях, использующих ряд основных характеристик объектов и сред и особенностей наведенных полей. Приближенные решения часто оказываются простыми и практически столь же точными, как и математически строгие решения. Такие подходы целесообразно использовать в задачах, если необходимо охватить проблему в целом и представить наглядно структуру и характерные особенности акустических полей в модельной среде [4, 5].

Ряд развитых аналитико-численных методов позволяют учесть особенности влияния неоднородности структурированной среды на распространение волновых полей. Если неоднородность слабо выражена и свойства среды мало изменяются на расстоянии, сравнимом с длиной волны, эффективной является лучевая теория, позволяющая описать рефракционные искажения акустического поля при распространении. Если линейные размеры объема, в котором происходит рассеяние акустических волн, не очень велики по сравнению с длиной волны, то используются метод конечных разностей и метод конечных элементов. Метод возмущений применим к средам со слабой неоднородностью при определенных величинах характерного размера неоднородности, длины волны и пути волны в неоднородной среде. В отдельных случаях требуется использование статистических методов. При этом неоднородность среды может быть описана, например, с помощью изотропной и стационарной пространственной флуктуации скорости звука в среде с нормированной функцией автокорреляции, зависящей от характерного размера неоднородности (радиуса корреляции). Следует отметить, что пока не существует метода, позволяющего решать поставленные краевые задачи единообразно для всего диапазона значений параметров моделируемых сред.

Для описания анизотропного поля источника - антенны используется измеренная либо рассчитанная теоретически характеристика направленности антенны. Полная математическая модель процесса профилирования дна содержит описание особенностей затухания поля источника при распространении в водной и осадочной толще, его рефракционных искажений, а также изменений положения точки излучения-приема вследствие произвольного движения носителя.

Особенности цифровой регистрации и обработки профилограмм, включая привязку к навигационным данным и томографическую реконструкцию донной структуры, описываются системными моделями конкретных аппаратно-программных реализаций систем профилирования.

Таким образом, для эффективного решения задач профилирования с использованием указанных аналитических подходов необходимо разработать:

- ряд структурных моделей, отражающей стратиграфические и литологические особенности дна в достаточном для практики диапазоне значений;
- ряд гидроакустических моделей, позволяющих как сугубо аналитическими, так и численными методами проследить специфику формирования, рассеяния и распространения акустических полей в сложно структурированных средах, содержащих движущийся источник поля (антенну профилографа);
- ряд системных моделей, отражающих особенности аналоговой обработки принятых эхо-сигналов в приемных трактах, их регистрации и последующей алгоритмической обработки вплоть до стадии включения результатов обработки в базы данных.

Сформированные структурные модели могут быть многократно использованы в качестве «виртуальных полигонов» для разрабатываемых систем профилирования.

Идеализированные модели системы «антенна профилографа - водная толща - дно» отражают лишь основные особенности структуры дна и его динамического поведения. Рассмотрение сложных и более близких к реальным средам моделей дает возможность учесть при анализе те физические явления, которые определяют тонкую структуру эхо-сигналов. Исследование особенностей полей отклика (формы импульсов, резонансов амплитудно-частотных характеристик сред и др.) может быть эффективным средством выявления структуры дна и обнаружения локализованных акустических неоднородностей.

Обычно при моделировании используется стратегия постепенного усложнения и дифференциации изначально простой и общей структурно-акустической модели дна. Такой подход дает возможность рассмотреть большинство аспектов проблемы обнаружения неоднородностей донной структуры гидролокационными методами.

Основной целью анализа развиваемых моделей является построение простых, содержательных и эффективных в прикладном отношении физических интерпретаций найденных решений. Это позволяет использовать результаты моделирования при разработке систем профилирования, обеспечивающих получение качественных стратиграфических картин дна. Математическое моделирование процесса профилирования дает возможность детально проанализировать многие важные аспекты обследования структуры дна.

Изменчивую структуру реального дна сложно единообразно описать и учесть в рамках какой-либо одной структурно-акустической модели, поэтому при анализе обычно используются локальные и упрощенные структурные модели, характеризующие отдельные участки дна.

Моделирование структуры дна, при котором непосредственно задаются значения механико-акустических характеристик в каждом элементарном объеме пространства, применительно к большим объемам сложно структурированной среды трудоемко и весьма неэффективно. Поэтому практически всегда созданию таких моделей предшествует формализованное в большей или меньшей степени описание структурных особенностей среды. Эти модели, в свою очередь, не обладают достаточной гибкостью, поскольку в них отсутствует формализованная процедура выделения структурных особенностей среды и не определены критерии такого выделения. Моделирование, основанное на выделении структурных особенностей среды согласно определенных (в том числе с использованием экспериментальных данных) критериев является обобщением более простых структурных моделей.

В работе реализовывались алгоритмы моделирования реальных донных структур, характеризующихся в большей или меньшей степени слоистостью, морфологией, а также случайными флуктуациями свойств и локализованными неоднородностями (полостями и включениями).

Можно выделить два класса модельных представлений оструктурированной среды. В первом случае среда представляется системой границ между областями с заданными характеристиками. Последовательность поверхностей $z_k(x, y)$, образует 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 $C_k(f_x, f_y)$.

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 $\Psi(dv) = \{\rho, \phi, \lambda, \mu, \dots\}$ взаимосвязанных свойств, например, плотностью ρ , пористостью ϕ , упругими постоянными Ламе λ и μ и т.д. Необходимо найти метод, конструирующий массив значений $\Psi(dv \in V)$, отвечающих с необходимой степенью точности реальной донной структуре.

Будем считать, 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 представляются функцией вида:

$$\Psi(x, y, z) = \sum \Psi_k g_k(x, y, z). \quad (2)$$

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

$$g_k(x, y, z) = \begin{cases} 1, & z \in [z_k, z_{q>k}) \\ 0, & z \notin [z_k, z_{q>k}) \end{cases}. \quad (3)$$

Во втором, более общем случае, распределение свойств среды представляется произвольной функцией координат в исследуемом объеме среды.

Рассмотрим построение непрерывной модели неоднородной донной структуры.

Пусть в области моделирования V дно не имеет явно выраженной слоистости, однако является неоднородным. Другими словами, пусть состояния Ψ_k не образуют определенного дискретного ряда, а k -домены не имеют четких границ. Подобная модель может использоваться, в частности, при описании неоднородностей в слоях донных структур. Рассмотрим в качестве примера описание структуры, образованной граничащими неоднородными полупространствами Ω_1 и Ω_2 . Свойства элементов такой структуры можно описывать функцией (т.е. задавать способ композиции):

$$\Psi(x, y, z) = \Psi_1(x, y, z)U_-(z)U_+[Z(x, y) - z] + \Psi_2(x, y, z)U_-[z - Z(x, y)], \quad (4)$$

где функция $Z(x, y)$ определяет форму границы полупространств Ω_1 и Ω_2 , а функции $\Psi_1(x, y, z)$ и $\Psi_2(x, y, z)$ задают свойства материала этих полупространств. Функции в (4) удобно задавать в следующей форме:

$$Z(x, y) = z^0 + \delta z(x, y) = z^0 + F_2^{-1}[C_z(f_x, f_y)]; \quad (5)$$

$$\Psi_q(x, y, z) = \psi_q^0 + \delta \psi_q^0(x, y, z) = \psi_q^0 + F_3^{-1}[C_q(f_x, f_y, f_z)], \quad q = 1, 2.$$

Такие модели можно определить как дискретные и непрерывные соответственно. По этим направлениям были разработаны две группы соответствующих алгоритмов.

Синтез моделей проводился в среде Matlab с помощью специализированных script-функций и GUI-оболочки. Для последующего использования синтезированных моделей сохранялись либо пространственные спектры их структурных элементов, либо т.н. каркасы структур. Во всех вариантах использования модели, использующие каркасы, требовали существенно меньших затрат памяти и процессорных мощностей. Реконструкция таких моделей по их каркасам может оказаться оптимальной для выполнения системами параллельных вычислений (кластерами ПЭВМ). Для полного решения вопроса оптимизации необходимы масштабные численные эксперименты и доводка алгоритмов синтеза пространственных распределений акустических свойств элементов моделируемых сред.

Разработанные алгоритмы построения структурно-акустических моделей (рис. 1,2,3) неоднородного слоистого дна могут быть использованы для анализа отдельных прикладных задач гидроакустики. Алгоритмы синтеза структурно-акустических моделей позволяют создавать так называемые «виртуальные полигоны», которые применимы в задачах моделирования процессов профилирования и стратификации дна, гидролокационной и интерферометрической съемки дна и донного рельефа. Одним из наиболее иллюстративных примеров является синтез неоднородного дна с целью определения рельефа донной поверхности по результатам анализа интерферометрического изображения дна. Интерферометрические системы позволяют производить оценку неровностей рельефа дна, обнаруживать пологие впадины и выступы, не дающие гидроакустической тени, различать участки дна с отрицательными и положительными уклонами.

Наиболее проблемной задачей анализа интерферометрических изображений является создание алгоритмов устойчивого выделения линий интерференционных максимумов и устранения неоднозначности определения их номеров. Для устойчивого выделения линий интерференционных максимумов был разработан корреляционный метод обработки, прошедший апробацию на синтезированных интерферограммах виртуальных полигонов и показавший свою высокую эффективность. Суть метода состоит в построении и оценке двумерных функций взаимной корреляции между каждой из реализаций интерферограммы и последовательностью опорных сигналов. Задача устранения неоднозначности определения номеров линий интерференционных максимумов сводится к исключению ложных сигналов, не попадающих на линии, и к устранению областей разрывов линий, соответствующих зонам тени. Для решения этой задачи был разработан алгоритм, основанный на минимизации оценки функций, описывающих линии интерференционных максимумов. Алгоритмы выделения и идентификация линий интерференционных максимумов, как показывают численные оценки, могут успешно использоваться при решении задачи анализа сложных интерферометрических изображений.

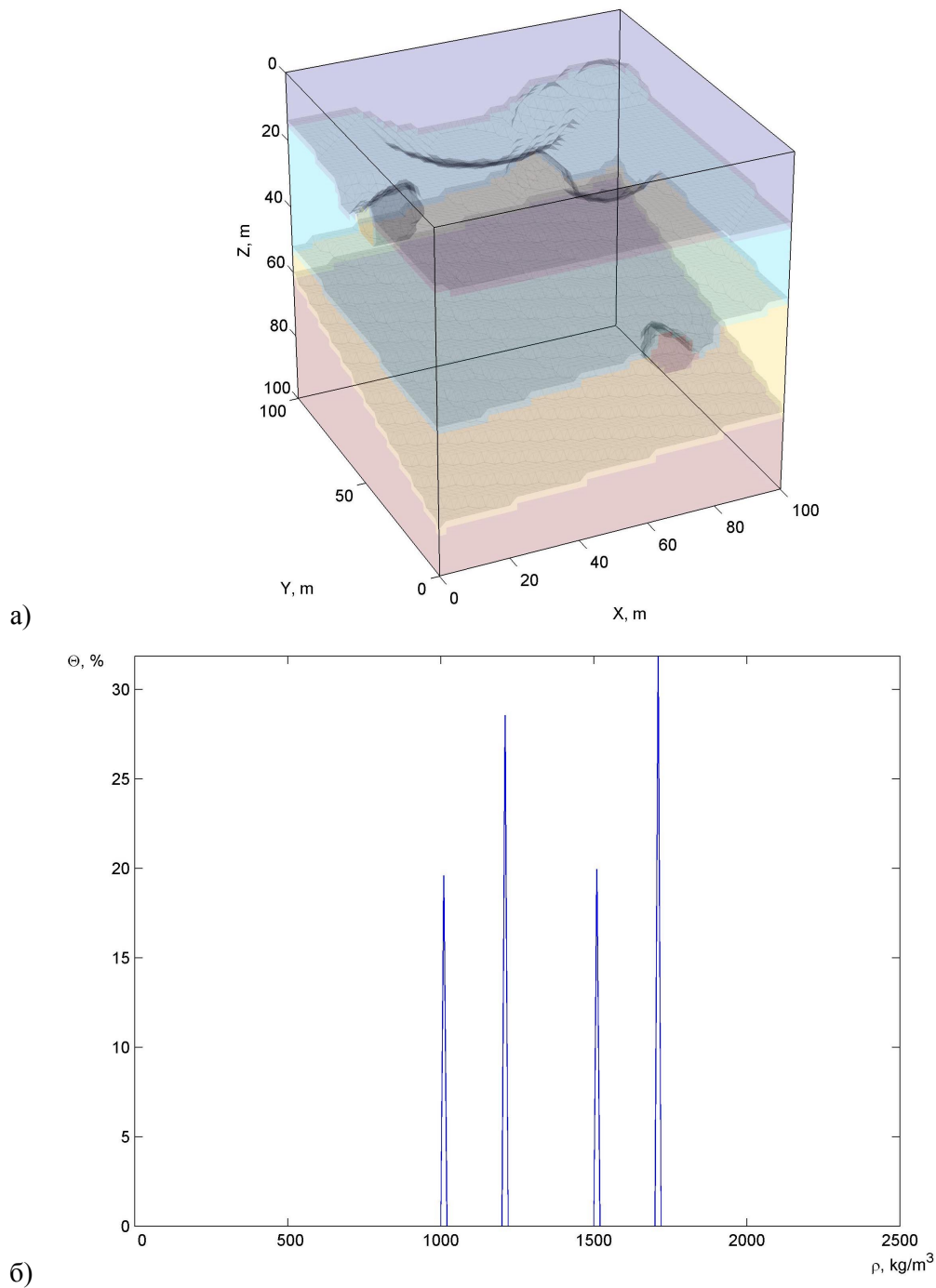
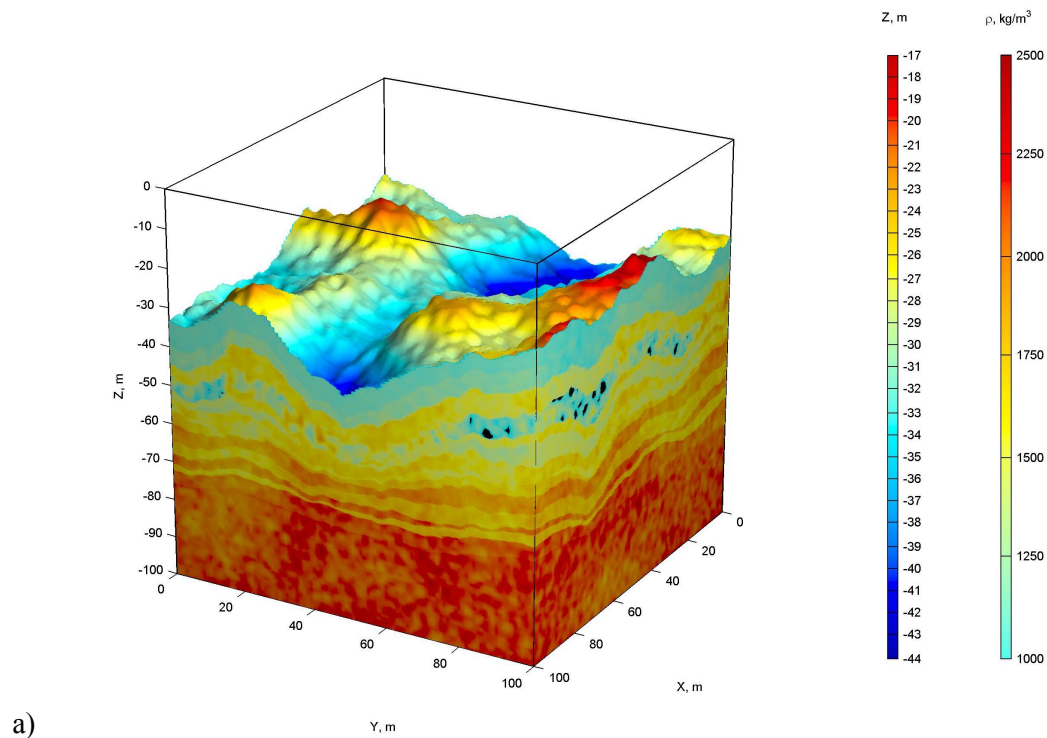
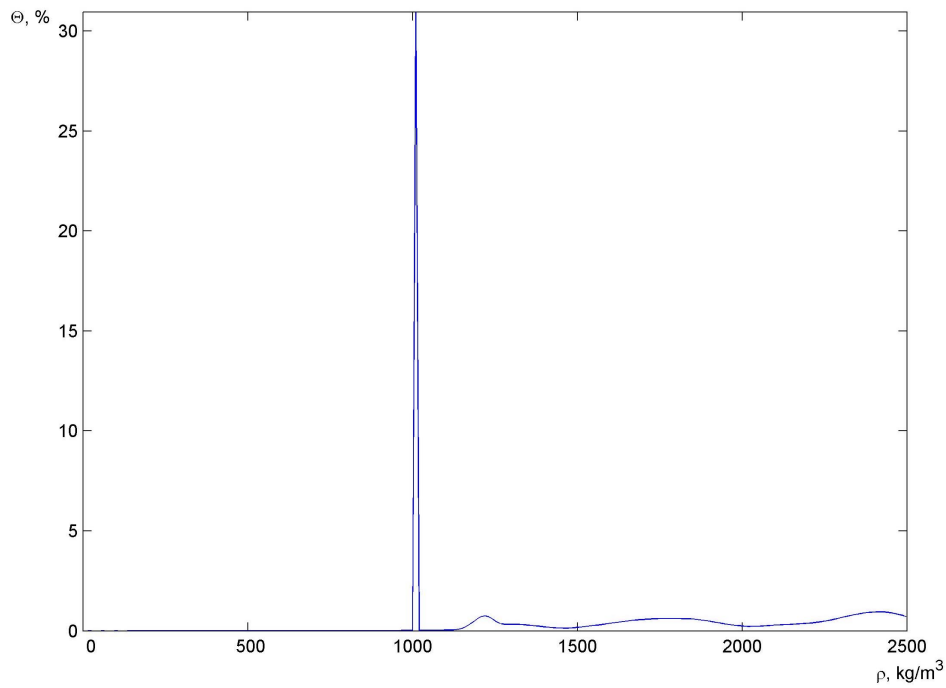


Рис. 1. Структурно-акустическая модель III типа, синтезированная в кубе $100 \times 100 \times 100$ м (дискретизация $1 \times 1 \times 0.5$ м) по каркасу из 13 источников, относящихся к 4 состояниям:

- a) пространственное распределение $\Psi(\vec{r})$ структурных элементов модели;
- б) относительное содержание модельных состояний $\Theta(\Psi)$, % на оси плотностей ρ , кг/м^3



а)



б)

Рис. 2. Смешанная структурно-акустическая модель II типа, синтезированная в области $100 \times 100 \times 100$ м (дискретизация $1 \times 1 \times 0.2$ м); содержит многочисленные мелкие полости:

а) распределение плотностей $\rho(x, y, z)$ элементов модели и рельеф $Z(x, y)$;

б) относительное содержание модельных состояний $\Theta(\Psi)$, % на оси плотностей ρ , кг/м³

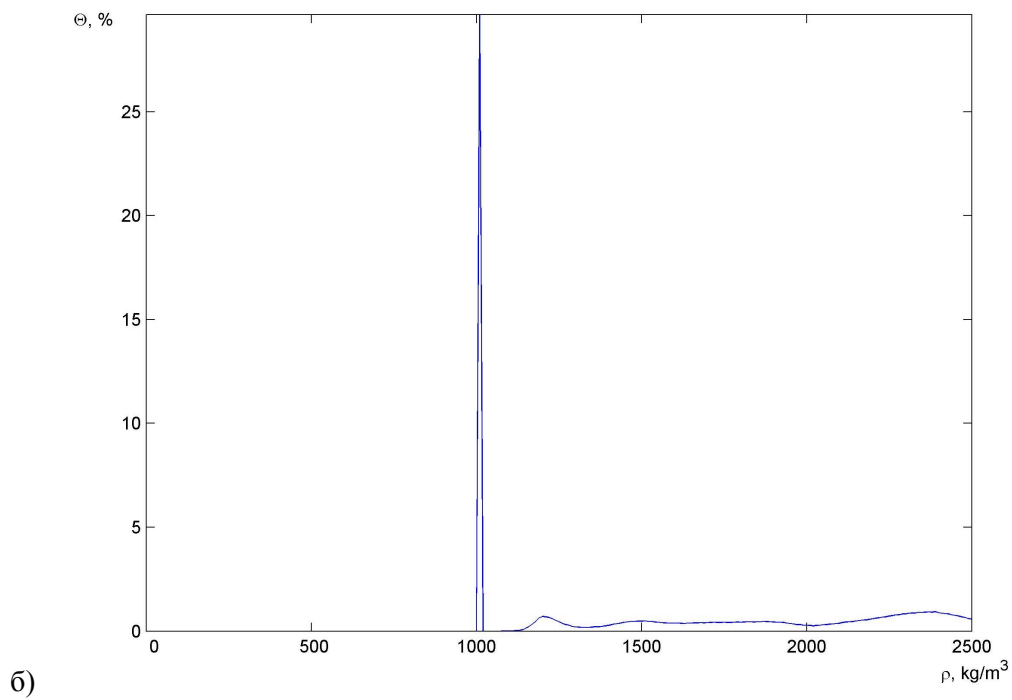
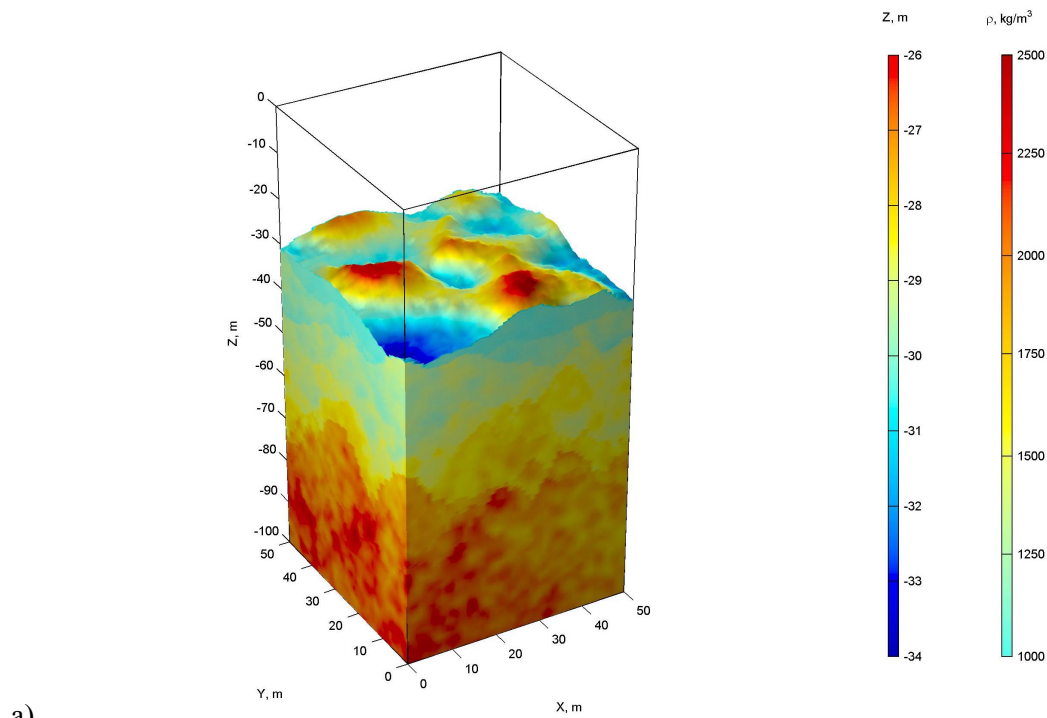


Рис. 3. Смешанная структурно-акустическая модель II типа, синтезированная в области $50 \times 50 \times 100$ м (дискретизация $1 \times 1 \times 0.2$ м):

а) распределение плотностей $\rho(x, y, z)$ элементов модели и рельеф $Z(x, y)$;

б) относительное содержание модельных состояний $\Theta(\Psi)$, % на оси плотностей ρ , кг/м³

В этом примере виртуальные полигоны, синтезируемые с помощью разработанных алгоритмов структурно-акустического моделирования, играют роль массивов исходных данных для задачи интерферометрии. Другая область применения структурно-акустических моделей дна – синтез и анализ профилограмм – требует детального знания методов расчета акустических полей в неоднородных средах.

Литература

1. Гончар А.И. и др. Гидроакустические методы и средства исследования дна Мирового Океана. НТЦ ПАС НАН Украины, Запорожье, 2002, 222 с.
2. Справочник по гидроакустике / А.П. Евтютов, А.Е. Колесников, А.П.Ляликов. – Л.: Судостроение, 1982. 344 с.
3. Гончар А.И. и др. Использование математических моделей при разработке панорамных гидроакустических систем // Труды конф. НО-2004, СПб, 2004.
4. Собисевич Л.Е, Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. – М.:ОИФЗ РАН, ГНИЦ ПГК (МФ) при Куб ГУ Минобразования России, 2001. – 299 с.
5. Ляпин А.А, Селезнев М.Г., Собисевич Л.Е. Механико-математические модели в задачах активной сейсмологии. Под общей редакцией Собисевича Л.Е. – М.: ГНИЦ ПГК (МФ) при Куб ГУ Минобразования России, 1999. – 294 с.