https://doi.org/10.15407/gpimo2021.04.039

О.Л. Шундель, канд. фіз.-мат. наук, наук. співроб.
E-mail: lixyta666@gmail.com
С.Г. Федосеєнков, канд. геол. наук, завідувач відділом
E-mail: 22lex22s@ukr.net
С.І. Невєрова, наук. співроб.
E-mail: sidzp2019@gmail.com
ДУ «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»
03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 42

ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ СТРУКТУРНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ НЕОДНОРІДНОГО ШАРУВАТОГО ДНА

У статті описано розроблені та реалізовані аналітико-чисельні методи для моделювання шаруватих геологічних структур з порожнинами простої та складної форми. Наведено розроблені авторські аналітико-чисельні методи математичного моделювання структури та просторового розподілу акустичних властивостей морських відкладів, що представлені як шарувате неоднорідне середовище. Такий підхід дозволяє створювати дискретні, безперервні або змішані структурно-акустичні моделі неоднорідного морського дна з урахуванням розшарування, флюїдо- та газонасичених донних відкладів, наявності в них порожнин і включень різних форм і властивостей. Створені моделі геологічного шаруватого середовища необхідні для моделювання панорамної зйомки (роботи гідролокатора бокового огляду (ГБО), ГБО з інтерферометричним каналом, багатопроменевого ехолоту), тривимірного профілювання, побудови ізобатичних карт за результатами вимірювань ехолотом.

***Ключові слова*:** *просторовий спектр, донні відклади, перетворення Фур'є, геоакустичні параметри донних відкладів, границя розділу, кластерний аналіз.*

Оцінка відгуку від дна, що містить множину локалізованих і розподілених неоднорідностей, на імпульсний вплив вимагає апріорного знання всіх особливостей структури осадової товщі і акустичних властивостей її елементів. Мінливу структуру реального дна складно описати загалом з використанням однієї моделі, тому при аналізі таких структур зазвичай використовуються локальні і спрощені моделі, що характеризують окремі ділянки дна.

Візьмемо окреме геофізичне середовище M, яке є сукупністю певним чином взаємопов'язаних і взаємодіючих геофізичних полів $M_j(\vec{r})$, тобто $M \equiv \{M_j\}$. Поля описують просторовий розподіл відповідних геофізичних параметрів μ_j. Такий

Цитування: Шундель О.Л., Федосеєнков С.Г., Невєрова С.І. Принципи створення структурних геологічних моделей неоднорідного шаруватого дна. *Геологія і корисні копалини Світового океану.* 2021. **17**, № 4: 39—51. https:// doi.org/10.15407/ gpimo2021.04.039

розподіл можна вважати квазістаціонарним, якщо не враховувати перехідні і швидкоплинні процеси.

Параметрами μ_j можуть слугувати щільність, пружні характеристики, сейсмічні напруги, швидкість звуку, акустичний імпеданс та ін. Вони також можуть мати скалярну, векторну або, в загальному випадку, тензорну природу. Оскільки одні параметри можуть виражатися через інші, при моделюванні раціонально редукувати μ_j до сукупності деяких первинних параметрів [5].

Можна стверджувати, що поля M_j описують структуру середовища M і визначають, тим самим, її динаміку, а саме: стійкість (вимагає окремого розгляду) і поведінку при взаємодії з зовнішніми (додатковими) джерелами полів $P_q(\vec{r})$. У загальному випадку для кожного виду (*q*) зовнішнього поля може існувати безліч джерел. Надалі поля будемо називати полями структури, а поля P_q — полями джерел.

Моделювання структури геофізичного середовища *М* (структурне моделювання), при якому безпосередньо задаються значення полів M_j в кожному елементарному діапазоні простору, назвемо моделюванням І типу. Таке моделювання, яке застосовується до великих обсягів складно структурованого середовища, є трудомістким і надто неефективним. Тому практично завжди створенню моделі І типу передує більш-менш формалізований опис геометрико-топологічних особливостей середовища *М* (моделювання ІІ типу). Моделі ІІ типу не відзначаються достатньою гнучкістю і верифікованістю, оскільки в них відсутня процедура виділення структурних особливостей середовища і не визначені критерії такого виділення. Моделювання, засноване на виділенні структурних особливостей середовища відповідно до визначених (в тому числі з використанням експериментальних даних) критеріїв, назвемо моделюванням ІІІ типу. Зауважимо, що моделі ІІІ типу є узагальненням моделей ІІ типу, які, в свою чергу, узагальнюють моделі І типу.

Структурні моделі І і ІІ типів. Розглянемо загальні принципи моделювання реальних донних структур, які характеризуються різновидами шаруватості, морфології, а також випадковими (флуктуації властивостей) і детермінованими (локалізованими) неоднорідностями.

Можна виділити два класи модельних уявлень структурованого середовища [7]. У першому випадку середовище представляється системою границь між областями з заданими характеристиками. У другому, більш загальному випадку, розподіл властивостей середовища представляється довільною функцією координат в досліджуваному діапазоні середовища. Такі моделі можна визначити як дискретні і безперервні відповідно.

Дискретна модель шаруватого дна з локалізованими неоднорідностями. Розглянемо побудову дискретної моделі донної структури (рис. 1). Нехай в системі координат задана область $V = X \times Y \times Z$ донної структури. Кожен елемент $dv \in V$ дна характеризується сукупністю $\psi(dv)=\{\rho, \varphi, \lambda, \mu,...\}$ взаємопов'язаних властивостей, наприклад, щільністю ρ, пористістю φ, пружними постійними Ламе λ і μ тощо. Будемо шукати метод, який конструює масив значень $\psi(dv \in V)$, які відповідають з високою точністю реальній донній структурі.

Нехай в області *V* осадової товщі виділяються K+1 структурних станів $\psi_k(k = 0...K)$, відповідних водному середовищу (ψ_0) і шарам дна ($\psi_{1...K}$). Відповідні станам горизонтально протяжні області (можливо, багатозв'язкові) $\Omega_k \in V$ будемо називати k-доменами. Області Ω_k в даному випадку є елементами донної структури [4].

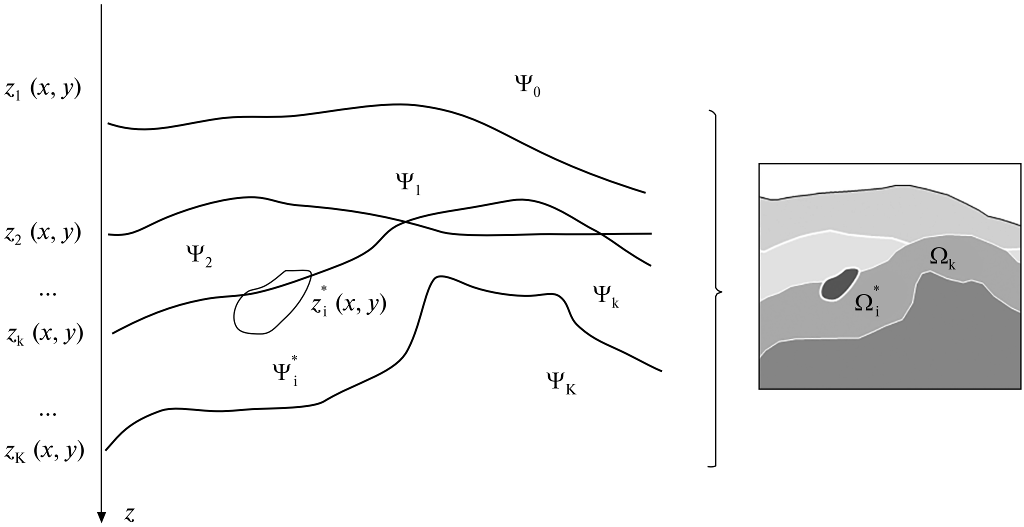

Рис. 1. Моделювання дискретної донної структури з локалізованою неоднорідністю

Введемо для дискретного ряду станів ψ_s впорядковану послідовність поверхонь $z_k(x, y)$, які утворюють донні горизонти. Функції $z_k(x, y)$ зручно задавати в такій формі [5, 16]:

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

де z_k^0 — середні рівні залягання горизонтів z_k; δz_k — відхилення горизонтів z_k від середніх рівнів z_k^0, причому ці відхилення визначаються шляхом зворотного двомірного Фур'є-перетворення (F_2^{-1}) власних просторових спектрів $C_k(f_x, f_y)$.

Значення z_k^0 формально є нульовими членами Фур'є-розкладів утворюючих поверхонь z_k, однак винесені зі спектрів C_k в силу того, що зазвичай $z_k^0 \gg \delta z_k$ і $z_k^0 \gg F_2^{-1}[C_k(f_x, f_y)]$.

Просторові спектри $C_k(f_x, f_y)$ визначають морфологічні особливості горизонтів z_k, включаючи великі нерівності горизонтів (f_x і f_y малі) і їх малорозмірну стохастичну «шорсткість» (f_x і f_y великі). При $C_k(f_x, f_y)=0$ отримуємо морфологічно вироджені плоскі горизонти, що залягають на глибинах z_k^0. Тому в такій моделі всі форми поверхневого і внутрішнього рельєфу донної структури можуть розглядатися в якості збурень ідеально компланарної шаруватої структури. Якщо вважати, що морфологію внутрішньої структури дна задає, як правило, більш щільна підкладка (горизонт z_k), то просторові спектри C_k слід визначати рекурсивно:

$$C_{k-1} = C_k + \varepsilon_k, \tag{2}$$

де $\varepsilon_k(f_x, f_y)$ — функції які виражають ступінь кореляції форми суміжних горизонтів.

При $\varepsilon_k(f_x, f_y)=0$ сусідні горизонти матимуть однакову форму, що дозволяє описувати «успадкування» форми внутрішніх горизонтів донної структури, обумовлене їхнім спільним генезисом. Топологічна зв'язність донних шарів визначається функціями $\varepsilon_k(f_x, f_y)$. Дійсно, випадкові відхилення $\varepsilon_k(f_x, f_y)$ від нульового значення визначають взаємну неузгодженість форми горизонтів донної структури, а значить, їх можливий перетин в просторі. Якщо суміжні горизонти корельовані слабо, тобто $\langle|\varepsilon_k(f_x, f_y)|\rangle \gg 0$, то топологічна зв'язність шарів буде залежати від співвідношення потужностей Δz_k^0 горизонтів і величин δz_k їх відхилень. У свою чергу, відхилення δz_k, які випливають з (1) і (2), можуть бути описані функціями $\varepsilon_k(f_x, f_y)$ [6, 16].

Для генерації просторових спектрів C_k (або функцій ε_k) при моделюванні шаруватого дна введемо двовимірне нормальне випадкове поле $N(\vec{f})$, реалізація якого в просторі $\vec{f} = (f_x, f_y)$ визначається середнім μ і дисперсією σ. Введемо також сукупність двовимірних нормальних субфільтрів $f_c(\vec{f})$, які описуються виразами [5, 16]:

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

$$\xi_c = 1 - \sqrt{\rho_c^2},\ u_{cx} = \frac{f_x - \mu_{cx}}{\sigma_{cx}},\ u_{cy} = \frac{f_y - \mu_{cy}}{\sigma_{cy}};\ \sigma_{cx} > 0,\ \sigma_{cy} > 0,\ |\rho_c| \le 1, \quad (3)$$

що утворюють фільтр $F(\vec{f})$ виду:

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

де $w_c > 0$ — вага субфільтрів.

Кожен субфільтр виду (3) дозволяє описувати квазівипадкові структурні елементи одного просторового масштабу, які залежать від параметрів $\vec{\mu}_c = (\mu_{cx}, \mu_{cy})$ і $\vec{\sigma}_c = (\sigma_{cx}, \sigma_{cy})$.

Всі нормальні субфільтри такі, що

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

Тому:

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

Просторові спектри $C_k(\vec{f})$ горизонтів z_k шаруватої донної структури будемо вважати результатом фільтрації $F(\vec{f})$ випадкового поля $N(\vec{f})$, визначаючи в такий спосіб:

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

Розглянемо тепер один з можливих способів композиції синтезованих горизонтів z_k в донну структуру, тобто способу визначення властивостей будь-якого з елементів шаруватого дна за заданими функціями z_k [6, 16]:

$$\psi(x, y, z) = \sum_k \psi_k U_-(z - z_k)\prod_{q>k} U_+(z_q - z).$$

Будемо вважати, що елемент $dv \in V$ осадової товщі належить домену Ω_k (тобто $\psi(dv) = \psi_k$), якщо він розташований під границями z_k (тобто $z > z_k$) і над усіма границями $z_{q>k}$ (тобто $z < z_{q>k}$). Для цього представимо властивості елементів донної структури функцією виду:

$$\psi(x, y, z) = \sum \psi_k g_k(x, y, z),$$

де $g_k(x, y, z)$ — так званий генератор донної структури (метод композиції структурних елементів), що має в даному прикладі вигляд:

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

Використовуючи для опису умов $z-z_k \geq 0$ і $z_{q>k}-z \geq 0$ одиничні функції $U_-(\xi)=\begin{cases} 1, & \xi \geq 0 \\ 0, & \xi < 0 \end{cases}$ і $U_+(\xi)=\begin{cases} 1, & \xi > 0 \\ 0, & \xi \leq 0 \end{cases}$, отримаємо наступне представлення генератора донної структури:

$$g_k(x, y,z) = U_-(z-z_k)\prod U_+(z_q-z) .$$

Тоді властивості елементів осадової товщі описуються функцією:

$$\psi(x, y,z)= \sum_k \psi_k U_-(z-z_k)\prod_{q>k} U_+(z_q-z).$$

Поверхня рельєфної і неоднорідної осадової товщі з усіма її морфологічними і структурними особливостями формально є верхньою границею нульового домену і визначається виразом [4]:

$$\begin{cases} \psi(x, y,z)=\psi_0 \\ \psi(x, y,z+dz) \neq \psi_0 \end{cases} \text{або} \begin{cases} \psi=\psi_0 \\ d\psi/dz \neq 0 \end{cases} .$$

Необхідно відзначити, що не існує теоретичних обмежень на порядок (кількість шарів K) і морфологічну деталізацію (верхні частоти спектрів C_k) дискретної донної структури, яка моделюється.

Неоднорідності, локалізовані в шаруватій донній структурі, можна моделювати у вигляді *i*-доменів Ω_i^*, які мають властивості ψ_i^* і обмежених замкнутими поверхнями $z_i^*(x, y)$. Структура шаруватого дна, що містить множину локалізованих неоднорідностей, описується наступним виразом [16]:

$$\psi(\vec{r}) = \begin{cases} \sum \psi_k g_k(\vec{r}), & \vec{r} \in V \setminus \Omega_i^* \\ \psi_i^*, & \vec{r} \in \Omega_i^* \end{cases} .$$

Таким чином, при моделюванні дискретної (стратифікованої) донної структури виділяються K структурних станів ψ_k, яким відповідають протяжні і, в загальному випадку, багатозв'язкові області (домени) Ω_k. Для дискретного ряду станів ψ_k вводиться впорядкована послідовність поверхонь $z_k(x, y)$, які утворюють донні горизонти (стани можуть повторюватися у напрямку седиментації). Різномасштабні морфологічні особливості горизонтів z_k визначаються їх просторовими спектрами $C_k(f_x, f_y)$. Якщо генеральну морфологію структури дна задає підкладка (скеляста основа), то спектри верхніх горизонтів можуть бути визначені рекурсивно. Дискретна донна структура описується функцією виду $\psi(\vec{r}) = \sum \psi_k g_k(\vec{r})$, де $g_k(\vec{r})$ — так званий генератор структури, який визначає спосіб формування k-доменів Ω_k. Порядок (кількість K станів ψ_k) і ступінь морфологічної деталізації (розмір ненульової області в спектрах C_k) дискретної донної структури, що моделюється, можуть бути задані довільно великими.

Безперервна модель неоднорідного дна. Розглянемо побудову безперервної моделі неоднорідної донної структури (рис. 2). Припустимо, що в області моделювання *V* дно не має явно вираженої шаруватості, проте є неоднорідним. Іншими словами, нехай стани ψ_k не утворюють певного дискретного ряду, а k-домени не мають чітких границь. Подібна модель може використовуватися, зокрема, при описі неоднорідностей в шарах донних структур.

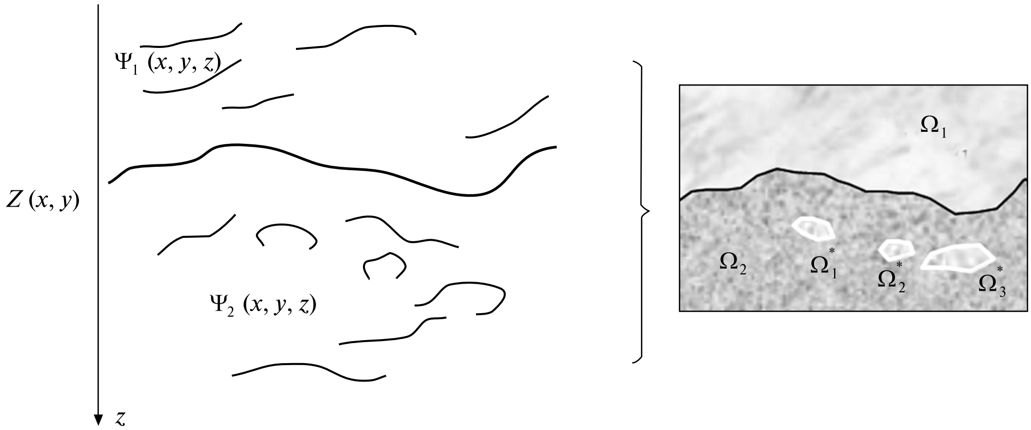

Рис. 2. Моделювання безперервної донної структури і виділення в ній неоднорідностей

Розглянемо як приклад опис структури, яка утворена граничними неоднорідними напівпросторами Ω_1 і Ω_2. Властивості елементів такої структури можна описувати функцією (тобто задавати спосіб композиції) [16]:

$$\psi(x, y, z) = \psi_1(x, y, z)U_-(z)U_+[Z(x, y) - z] + \psi_2(x, y, z)U_-[z - Z(x, y)], \qquad (5)$$

де Z(x, y) — функція, яка визначає форму границі напівпросторів Ω_1 і Ω_2, а функції $\psi_1(x, y, z)$ і $\psi_2(x, y, z)$ задають властивості матеріалу цих напівпросторів.

Функції в (5) зручно задавати в такій формі [5, 16]:

$$Z(x, y) = z^0 + \delta z(x, y) = z^0 + F_2^{-1}[C_z(f_x, f_y)];$$
$$\psi_q(x, y, z) = \psi_q^0 + \delta\psi_q^0(x, y, z) = \psi_q^0 + F_3^{-1}[C_q(f_x, f_y, f_z)],\ q = 1, 2.$$

При описі структури неоднорідного дна в безперервній моделі вважається, що відхилення $\delta z(x, y)$ від середнього значення z^0 визначають форму границь напівпросторів Ω_1 і Ω_2, а структурні збурення середні властивості напівпросторів задають їх внутрішні особливості. Різномасштабні морфологічні та структурні збурення середовищ можна задавати за допомогою двох- і тривимірних просторових спектрів C_z і C_q. Ці спектри можна, як і раніше, вважати результатом фільтрації деякого дво- або тривимірного випадкового поля.

Внутрішні границі в структурі дна, змодельованої даним способом, можна виділити, визначаючи локальні максимуми поля $|\vec{\nabla}\psi(x, y, z)|$.

Реальні донні структури завжди будуть відрізнятися від структур, що отримані в рамках дискретної і безперервної моделей. Можна лише говорити про ступінь наближення модельних уявлень до реальності. Слід зауважити, що безперервна модель є більш загальною — шаруватість може бути виражена спектрально, а за особливостями синтезованих спектрів можна оцінити ступінь шаруватості ґрунту. Крім того, в безперервній моделі завжди може бути виражена будь-яка локалізована неоднорідність структури дна.

Викладені концепції дозволяють створювати конструктивні структурні моделі реальної осадової товщі з різномасштабними збуреннями, локалізованими або розподіленими неоднорідностями, а також визначати відгук середовища на зовнішній вплив.

Принципи побудови структурних моделей III типу. Для побудови структурних моделей III типу середовища M зручно використовувати такі методи розпізнавання образів як, наприклад, кластерний аналіз. Розглянемо даний підхід до подібних досліджень більш детально.

Введемо простір ознак μ_j, відповідних «первинним» полям M_j. Нехай середовище характеризується деякими розподілами полів $M_j(\vec{r})$. Нормуємо ці значення для: $\forall j$:

$\tilde{M}_j(\vec{r}) = \dfrac{M_j(\vec{r}) - \min M_j(\vec{r})}{\max M_j(\vec{r}) - \min M_j(\vec{r})}$; тепер $0 \leq \tilde{M}_j(\vec{r}) \leq 1$. Відобразимо всі нормовані

значення $\tilde{M}_j(\vec{r})$ полів середовища M в одиничному j-мірному кубі з координатними осями μ_j (кубі ознак). Локальні максимуми щільності нормованих значень $\tilde{M}_j$ в кубі ознак відповідають деяким станам ψ_s середовища M. Фактично мова йде про побудову функції щільності ймовірності станів. Критерій, за яким може бути проведено розбиття куба ознак на області, які містять локальні максимуми щільності, в методах розпізнавання образів називається вирішальним правилом. Існує багато способів завдання вирішального правила [2, 3, 7, 9—13,15, 17—20]. Саме цей критерій визначає ступінь деталізації моделі геофізичного середовища M.

Нехай в результаті застосування деякого вирішального правила одиничний куб розбитий на S областей, тобто в заданій області Ω_M виділено S модельних станів $\psi_s = \{M_j^s\}$ середовища M і введено відхилення $\delta(\vec{r}) = ||M_j^s - M_j(\vec{r})||$ від ψ_s стану. Оскільки властивості елементу $\vec{r}$ середовища однозначно визначаються його належністю до одного зі станів ψ_s, структуру середовища природньо описувати деякою функцією станів $\psi(\vec{r})$, що приймає значення з дискретного набору $\psi(\vec{r})$. Залежно від вирішального правила (а значить, і деталізації структурного моделювання) область значень функції $\psi(\vec{r})$ може збільшуватися або зменшуватися. Можна стверджувати, що модельна структура середовища є результатом застосування до генеральної сукупності елементів середовища деякого вирішального правила [16].

Розглянемо можливі способи опису функції станів $\psi(\vec{r})$, вважаючи вирішальне правило заданим. Вирішальне правило не повинно змінюватися в ході моделювання; ознаки μ_j вибираються так, щоб елемент середовища ідентифікувався однозначно.

Віднесення конкретного елемента середовища (його реалізації), представленого значеннями його властивостей (ознак), до одного з фіксованого переліку образів (класів) за певним вирішальним правилом визначається як розпізнавання елемента середовища. Перелік образів, інформативних ознак і вирішальні правила або задаються розпізнаній системі ззовні, або формуються самою системою. Допоміжна функція систем, що розпізнаються — оцінка ризику втрат. Без цієї функції неможливо, наприклад, побудувати оптимальні вирішальні правила і вибрати найбільш інформативну систему ознак для розпізнавання.

Припустимо, що $2 \leq S < \infty$ — множина розпізнаваних образів (класів), назване алфавітом, X — ознаковий (вибірковий) простір, N — розмірність ознакового простору (кількість ознак, які характеризують розпізнавані об'єкти), D(X) — множина вирішальних правил, за якими здійснюється віднесення розпізнаваного об'єкта (реалізації) до того чи іншого образу, R — ризик втрат при розпізнаванні.

Кількість розпізнаваних образів S завжди кінцева і не може бути менше двох. Перелік образів може задаватися системі, що розпізнається, ззовні. У багатьох випадках система, що розпізнається, сама формує перелік розпізнаваних образів, тобто проводить кластерний аналіз. Розмірність ознакового простору N має бути мінімальною, оскільки при цьому скорочується кількість необхідних вимірювань, спрощуються обчислення, що формують і реалізують вирішальні правила, підвищується статистична стійкість результатів розпізнавання. Разом з тим зменшення N, взагалі кажучи, веде до зростання ризику втрат. Тому формування ознакового простору є компромісним завданням, яке можна розділити на дві частини: формування початкового простору ознак і мінімізація розмірності цього простору. У частині, що стосується мінімізації розмірності, існують формальні методи і алгоритми [1]. Проблема оптимального формування початкового простору на даний момент ще не вирішена. Побудова вирішальних правил — найбільш багата щодо розроблених підходів і методів вирішення компонента задач розпізнавання. Основна мета, яка при цьому переслідується — мінімізація ризику втрат.

Ризик втрат R фактично є критерієм, за яким формується найбільш інформативний ознаковий простір і найбільш ефективні вирішальні правила. І алфавіт, і ознаки, і вирішальні правила повинні бути такими, щоб по можливості мінімізувати ризик втрат. Цей критерій (характеристика системи, що розпізнається) є складовим. В нього в загальному випадку входять втрати на помилки розпізнавання і витрати на вимірювання ознак розпізнаваних об'єктів. Зазвичай в якості ризику втрат фігурує середня ймовірність помилки розпізнавання або максимальна компонента матриці ймовірностей помилок.

Таким чином, X можна уявити як якийсь простір розмірності N з певною в цьому просторі метрикою. Будь-який об'єкт (реалізація) представляється у вигляді точки (вектору) в цьому просторі. Проекція цієї точки на *i*-у вісь координат відповідає значенню *i*-ї ознаки. Методи вирішення задач розпізнавання, розглянуті в [1], умовно поділяються на детерміністичні і статистичні.

Будемо називати область Ω_s доменом стану s, якщо $\psi(\vec{r} \in \Omega_s) = \psi_s$. Середовище M, яке характеризується в області Ω_M M-модельними станами $\psi_s = \{M_j^s\}$, структурується S-доменами. При цьому $\Omega_M = \cup\Omega_s$; якщо для деякого стану ψ_s домен порожній ($\Omega_s = \emptyset$), то цей стан вважається не представленим в області Ω_M. Останній факт дозволяє описувати в моделі так звані віртуальні стани, які, будучи не представлені в даній області середовища, можуть проявитися в іншій її області, наприклад, при переміщенні джерела поля P_q. Моделювання функції станів $\psi(\vec{r})$ (акустична детермінація) зводиться до завдання областей Ω_s , які в реальному середовищі можуть мати вкрай складну топологію (бути багатозв'язними і/або містити не пов'язані між собою підобласті). Співвіднесення областей $\{\omega_s\}$, що утворюють Ω_s , зі станами ψ_s можна описувати орієнтованим графом $X(\Omega, \psi)$ структурно-акустичних зв'язків, початковими вершинами якого є ψ_s, а кінцевими — ω_s. Відзначимо, що структурно-акустичну модель можна вважати стійкою тільки в тому випадку, якщо варіювання вирішального правила не змінює графа $X(\Omega, \psi)$.

Для синтезу доменів Ω_s, що визначають структурні особливості середовища M, розглянемо деяку сукупність $\mathfrak{I} = \{\vec{R}, \zeta(\vec{R}), \xi(\vec{R})\}$, звану каркасом структури. Каркас $\mathfrak{I}$ складається з безлічі точок $\vec{R}$ (джерел) і функцій $\zeta(\vec{R})$ і $\xi(\vec{R})$, заданих на цій множині. Функція $\zeta(\vec{R})$, як і функція станів $\psi(\vec{r})$, приймає одне із S-значень, і визначає приналежність джерела $\vec{R}$ будь-якому стану ψ_s. Функція $\xi(\vec{R})$ є ваговою функцією джерела при синтезі доменів. Функцію станів $\psi(\vec{r})$ будемо визначати наступним чином [16]:

$$\psi(\vec{r}) = \zeta(\vec{R}): \min \tau(\vec{r}, \vec{R})$$

де — $\tau(\vec{r}, \vec{R}) = \xi^{-1}(\vec{R})\,|\vec{r} - \vec{R}|$ поле джерела $(\vec{R})$

Таким чином, завдання структурного моделювання середовища М зводиться до задачі синтезу каркаса структури $\mathfrak{I}$. Додатковою задачею є редукція каркасу структури.

Джерела, для яких $\zeta(\vec{R}) = \psi_s$, будемо називати s-джерелами I_s; вони утворюють каркас структури стану $\mathfrak{I} = \{\vec{R}_s, \psi_s, \xi(\vec{R})\}$. Множина точок простору, для яких виконуються умови $\tau = \tau(\vec{r}, \vec{R}_{\sigma 1})$ $\tau = \tau(\vec{r}, \vec{R}_{\sigma 2})$ при $\tau(\vec{r}, \vec{R}_\sigma) \geq \tau$ $(S_1 \neq S_2)$, є границею доменів Ω_{s1} і Ω_{s2} (можливо, також і деяких доменів Ω_j). Для визначення характеристик джерел, що породжують деяку границю $\Gamma(\vec{r})$ доменів і необхідно використовувати методи диференціальної геометрії [14]. Відзначимо тільки, що будь-яка границя $\Gamma(\vec{r})$ в такій моделі буде описуватися сукупністю сферичних і плоских областей.

Досить часто поля структури і поля джерел виявляється зручно описувати в системах криволінійних координат $(x^1, x^2, x^3) \equiv x^i$. Система (x^i) вважається заданою, якщо її функції $x^i = x^i(x, y, z)$ однозначні і є безперервно диференцюючими, причому якобіан перетворення $J \equiv \dfrac{\delta(x^1, x^2, x^3)}{\delta(x, y, z)} \neq 0$ [8].

Зауважимо, що система (x^i) не обов'язково повинна бути ортогональною. Криволінійні координати (x^i) дозволяють досить просто описати поля окремих типів джерел P_q, а вираз структури середовища в цих координатах іноді дозволяє спростити вид крайових задач.

Нехай моделюється деякий, досить великий, об'єм V_M середовища М. Розіб'ємо на багато елементарних об'ємів $dV_M \ll V_M$ так, щоб величина $J^{-1}dx^1\,dx^2\,dx^3$ була постійною, а величина $\sum_J \sum_k g_k(x^1, x^2, x^3)dx^i dx^k$ — мінімальною. Рівність (перша умова) і компактність (друга умова) елементарних об'ємів dV_M забезпечують коректність (статистичну репрезентативність) виконуваної вибірки (вимагає окремого розгляду).

Тут введені позначення $g_k(x^1, x^2, x^3) = \left[\dfrac{\delta x\,\delta x}{x^i\,x^k} + \dfrac{\delta y\,\delta y}{x^i\,x^k} + \dfrac{\delta z\,\delta z}{x^i\,x^k}\right]$ (g_k — компоненти метричного тензора) і $J^{-1} \equiv \dfrac{\delta(x, y, z)}{\delta(x^1, x^2, x^3)} = \sqrt{\det g_k[(x^1, x^2, x^3)]}$ [8].

Розбиття V_M на $dV_M(\vec{r}) = dV_M(x^i, x^i + dx^i)$ здійснюється завданням послідовностей $\{x^i\}$, які будуть повністю незалежні тільки в тому випадку, якщо V_M обмежений координатними поверхнями використовуваної системи координат (x^i). Найпростішим є евклідове розбиття, якому відповідав би $g_k = I$ і рівновіддалені значення в кожній послідовності $\{x^i\}$ (так звана рівномірна сітка розбиття). Іншими поширеними системами є сферична ($\sqrt{g} = r^2\sin\theta$) і циліндрична ($\sqrt{g} = \rho$) системи координат, для яких послідовності $\{r; \theta; \varphi\}$ і $\{\rho; \varphi; z\}$, які забезпечують коректність вибірки, вже не утворюють рівномірної сітки розбиття.

Приклади, що ілюструють побудову дискретних, безперервних і змішаних структурно-акустичних моделей дна II—III типів за допомогою концепцій, викладених у даній статті, показано на рис. 3, 4.

Синтез моделей проводився в середовищі *Matlab* за допомогою спеціалізованих *script*-функцій і *GUI*-оболонки. Для подальшого використання синтезованих моделей зберігалися або просторові спектри їх структурних елементів (моделі II типів), або каркаси структур (моделі III типу). У всіх варіантах використання мо-

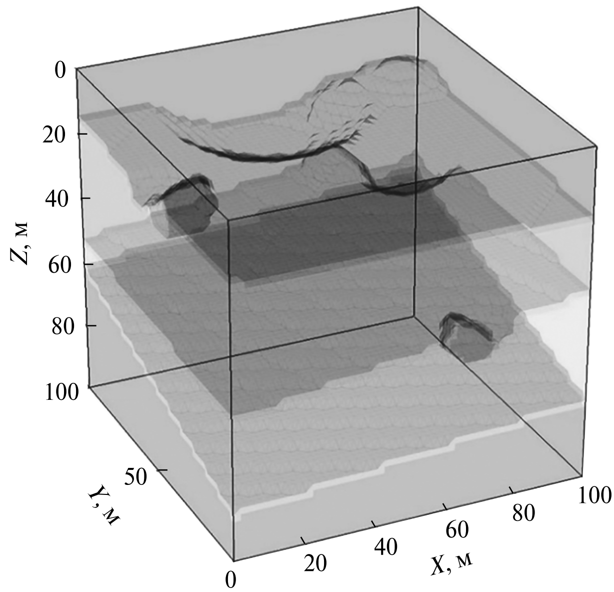

Рис. 3. Структурно-акустична модель III типу, синтезована в кубі 100×100×100 м (дискретизація 1×1×0,5 м) по каркасу з 13 джерелами, які відносяться до 4-х станів

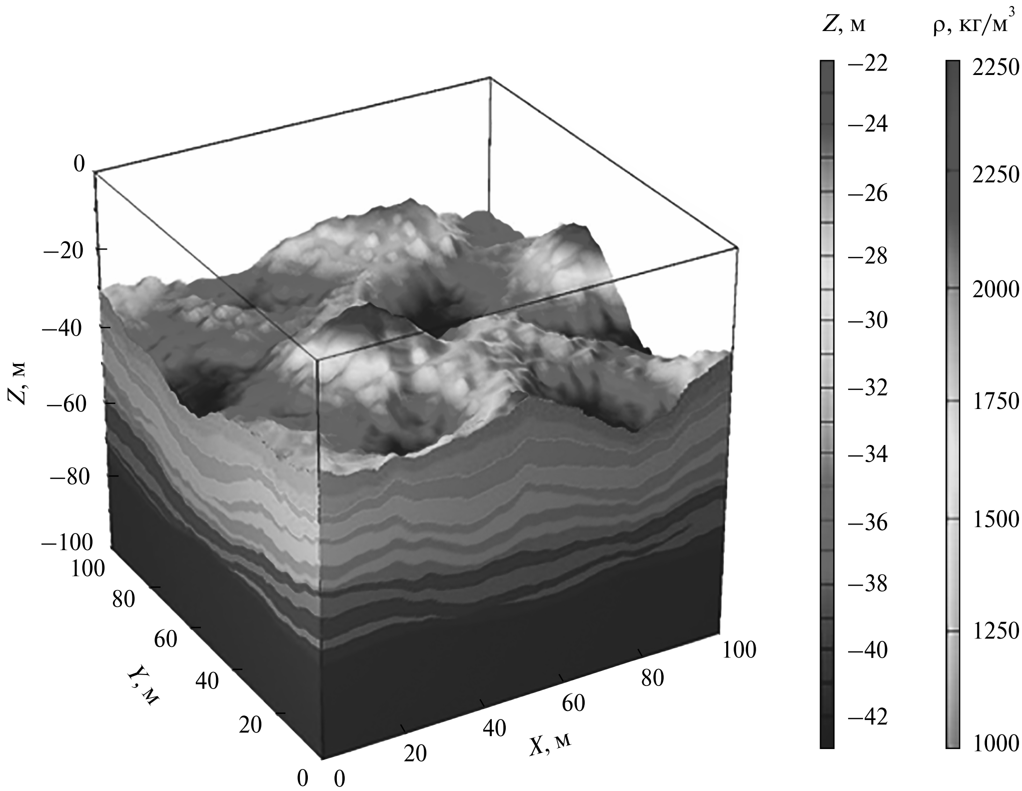

Рис. 4. Дискретна структурно-акустична модель II типу, синтезована в області 100×100×100 м (дискретизація 1×1×10.2 м); 14 станів у вигляді корельованих шарів із зростаючою щільністю

делі III типу вимагали значно менших витрат пам'яті і процесорних потужностей. Відкритим залишається питання суміщення безперервних моделей II типу, синтезованих спектрально, і моделей III типу, синтезованих по каркасам. Реконструкція моделей III типу за їх каркасами може виявитися більш оптимізованою для виконання системами розподілених обчислень (кластерами). Розроблені моделі апробовано в 7 науково-дослідних експедиціях у 2018—2019 рр. За результатами цих експедицій побудовані цифрові моделі рельєфу дна окремих ділянок р. Дніпро, р. Прип'ять та Чорного моря [16]. Для повного вирішення питання оптимізації необхідні масштабні чисельні експерименти і доведення алгоритмів синтезу просторових розподілів акустичних властивостей елементів модельованих середовищ.

Висновки

1. Розроблено аналітико-чисельні методи математичного моделювання структури та просторового розподілу акустичних властивостей морських відкладів, представлених як шарувате неоднорідне середовище. Розроблені методи дозволяють створювати дискретні, безперервні або змішані структурно-акустичні моделі неоднорідного морського дна, з урахуванням розшарування, флюїдо- та газонасичених донних відкладів, наявність в них порожнин і включень різних форм і властивостей.

2. Розроблені алгоритми генерації модельних донних структур дозволяють створювати, аналізувати і зберігати для подальшого використання просторові розподіли механіко-акустичних властивостей середовища (щільність, пружність постійних Ламе, швидкість поздовжніх та поперечних звукових хвиль, акустичного імпедансу і т. д.) довільного ступеня складності.

3. Для моделювання структурних елементів дна, була реалізована процедура багатокомпонентної фільтрації одно-, дво- або тривимірного нормального стохастичного поля просторових частот. Різні параметри спектральної фільтрації дозволяють створювати моделі донних структур з широким діапазоном шорсткості поверхонь донних шарів, взаємною кореляцією їх форми, одночасно синтезуючи різномасштабні за розміром та розподілом в просторі неоднорідності.

4. У дискретних моделях структура дна розглядається як просторова композиція зон фіксованих механіко-акустичних становищ (доменів структури). Композиція доменів здійснюється функцією — генератором структури, яка для кожної точки в просторі здійснює редукцію середовища з заздалегідь впорядкованою сукупністю станів. Елементи структури дна (шари донних відкладів, порожнин, включень) синтезуються в дискретних моделях як квазіоднорідні утворення. Безперервні моделі дозволяють синтезувати просторовий розподіл акустичних характеристик одночасно у всьому обсязі, що моделюється, і визначати границі локалізованих або розподілених неоднорідностей через локальні максимуми градієнта полів щільностей, швидкостей, імпедансів і ін. Змішані структурно-акустичні моделі дна поєднують характерні властивості дискретних і неперервних моделей.

5. ДУ «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України» провела 7 комплексних науково-дослідницьких експедицій: «Дніпро 2018», «Чорне море 2018», «Дунай 2018», «Чорне море 2019 (БДЛК)», «Чорне море 2019», «Дунай 2019», «Прип'ять 2019», в яких підтверджена доцільність використання розроблених математичних моделей геофізичних полів геологічних структур.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волошин Г.Я. Методы распознавания образов. Владивосток, ВГУЭС, 2000. 78 с.
2. Волошин Г.Я., Бурлаков И.А., Косенкова С.Т. Статистические методы решения задач распознавания, основанные на аппроксимационном подходе. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1992. 168 с.
3. Гогоненков Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. Москва: Недра, 1987. 220 с.
4. Гончар А.И., Неверова С.И., Шундель А.И., Шлычек Л.И. Создание системы компьютерного трехмерного моделирования геофизический полей геологических структур. *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*: Зб. наук. пр. Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України. 2010. № 7. С. 90—100.
5. Гончар А.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И., Писанко И.Н., Голод О.С. Создание структурно-акустических моделей морского дна. *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*: Зб. наук. пр. Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України. 2004. № 1. С. 13—21.
6. Гончар А.И., Шундель А.И., Федосеенков С.Г. Некоторые аспекты создания структурных моделей неоднородногослоистого дна. *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2013. Вип. 27. С. 151—155.
7. Кобрунов А.И. Параметризация в математических моделях геологических сред при решении обратных задач. *Геофиз. журнал*. 2001. Т. 23 (5). С. 3—12.
8. Корн Г., Корн Т. М. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Москва: Наука, 1974. 832 с.
9. Ларичев В.А., Лесонен Д.Н., Максимов Г.А., Подъячев Е.В., Деров А.В. Математическая модель трехмерной геологической среды с разрывами для решения прямых и обратных задач геофизики. *Сборник трудов. XVI Сессия РАО*. 14 —18 ноября 2005 года. Т. 1 Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Москва: ГЕОС, 2005. С. 321—324.
10. Ларичев В.А., Максимов Г.А., Попов П.В. Динамическая инверсия данных поверхностной сейсморазведки на основе глобальной оптимизации сплайновой модели тонкослоистого пласта. *Сборник трудов XX сессии РАО*. 27—31 октября 2008 г., Москва: ГЕОС, 2008. Т. 1. С. 348—350.
11. Лесонен Д.Н., Ларичев В.А., Максимов Г.А., Подъячев Е.В., Деров А.В. Построение структурных сеток трехмерных геологических сред произвольной топологии для решения волновых задач геофизики. *Сборник трудов XIX сессии РАО*. 24—28 сентября 2007 г., Нижний Новгород. Москва, ГЕОС 2007. Т. 1. С. 317—320.
12. Максимов Г.А., Ларичев В.А., Лесонен Д.Н., Подъячев Е.В., Деров А.В. Математическая модель трехмерной геологической среды с разломами для решения прямых и обратных задач геофизики. *Научно-практическая конференция «ВСП и трехмерные системы наблюдений в сейсморазведке»*. Москва, ЦГЭ. 2005. С. 118—121.
13. Патрик Э. Основы теории распознавания образов. Москва: Сов. радио, 1980. 407 с.
14. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. Москва: ГИТТЛ, 1956. 420 с.
15. Фу К.С. Структурные методы в распознавании образов. Москва: Мир, 1977. 320 с.
16. Шундель О.І. Розробка математичної моделі шаруватого неоднорідного середовища як складової частини банку океанографічних даних. Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Київ: Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України; 2021. 221 с. URL: http://www.igph.kiev.ua/ Specialcouncil/ 2021/Shundel/Shundel_dis.pdf
17. Billings D. Stephen, Rick K., Garry N. Newsam Interpolation of geophysical data using continuous global surfaces. *Geophysics*. 2002. Vol. 67(6). P. 1810—1822.
18. Dominique Apprato, Christian Gout, Dimitri Komatitsch. A New Method for Ck-Surface Approximation From a Set of Curves, With Application to Ship Track Data in the Marianas Trench1. *Mathematical Geology*. 2002. Vol. 34(7). P. 831—843.
19. Maximov G.A., Larichev V.A., Lesonen D.N., Pod'yachev E.V., Derov A.V. Mathematical model of 3D geological medium with raptures for solution of direct and inverse geophysical problems. *Proceedings of the XVI Session of the Russian Acoustical Society*. 2004. P. 252—255.

20. Rasmus Jan., Hjelle Øyvind. Multiresolution Spline Models and Their Applications.Geomorphology *Concepts and Modeling in Geomorphology: International Perspectives* TERRAPUB, Tokyo. 2003. P. 221—237.

Стаття надійшла 12.08.2021.

O.I. Shundel, Cand. Sci. (Phys.@ Math.), Researcher
E-mail: lixyta666@gmail.com
S.H. Fedoseienkov, Cand. Sci. (Geol.), Head of the Department
E-mail: 22lex22s@ukr.net
S.I. Nevierova, Researcher
E-mail: sidzp2019@gmail.com
State Institution «Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine»
Ukraine, Kyiv, 42 Akademika Hlushkova Ave.

PRINCIPLES OF FORMATION OF STRUCTURAL GEOLOGICAL MODELS OF HETEROGENEOUS LAYERED BOTTOM

The article describes the developed and implemented analytical and numerical methods for modeling layered geological structures with cavities of simple and complex shape. The developed author's analytical and numerical methods of mathematical modeling of the structure and spatial distribution of acoustic properties of marine sediments, presented as a layered inhomogeneous medium, which allow to create discrete, continuous or mixed structural-acoustic models of inhomogeneous seabed taking into account stratification, the presence of cavities and inclusions of various shapes and properties. Models of geological layered environment implemented according to these algorithms are necessary for modeling panoramic survey (SSS, SS with interferometric channel, multibeam sounder), three-dimensional profiling, construction of isobathic maps based on sounder measurements.

Keywords: spatial spectrum, bottom sediments, Fourier transforms, geoacoustic parameters of bottom sediments, section boundary, cluster analysis.