

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ІМ. С.І. СУББОТІНА**



ШУНДЕЛЬ Олексій Іванович

УДК 534.2, 551.462, 551.46.072

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ШАРУВАТОГО
НЕОДНОРІДНОГО СЕРЕДОВИЩА ЯК СКЛАДОВОЇ
ЧАСТИНИ БАНКУ ОКЕАНОГРАФІЧНИХ ДАНИХ**

04.00.22 – «геофізика»

103 – Науки про Землю

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державній установі «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України».

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України, доктор географічних наук, професор,
Щипцов Олександр Анатолійович,
Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»,
директор

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Верпаховська Олександра Олегівна,
провідний науковий співробітник Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України;
кандидат фізико-математичних наук,
Тішаєв Іван Васильович,
доцент кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32 та на електронному ресурсі: <http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розіслано «05» квітня 2021 р.

Вчений секретар Спеціалізованої
вченої ради Д.26.200.01
доктор геологічних наук

 М.І. Орлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Останні десятиліття відзначаються бурхливим інтересом до континентального шельфу, що в свою чергу посилює вимоги до деталізації опису гідроакустичних явищ на мілководді. Емпіричні гідрологічні і геологічні моделі в сукупності представляють узагальнену фізичну модель реального геосередовища. Натомість математична модель, як ідеалізація фізичної картини, в формалізованому вигляді дозволяє відображати його основні гідроакустичні особливості.

З появою сучасних високопродуктивних обчислювальних машин можливості математичного моделювання, як одного з ефективних засобів пізнання закономірностей будови шаруватих донних осадів, істотно розширилися. У загальноприйнятому розумінні геоакустична модель описує шар води та осадову товщу, що складається з пухких і консолідованих осадів. Вона має два рівня представлення - якісний (описовий) і кількісний, в якому всі характеристики формалізуються у вигляді просторово-часових залежностей. Наприклад, швидкість звуку у відкладах представляється як функція координат глибини і місця, які діалектично пов'язані між собою. Знання якісного геологічного складу осадів дозволяє робити висновки про кількісні значення параметрів моделі. І, навпаки, отримані акустичними або сейсмічними методами кількісні значення параметрів моделі можуть вносити свої корективи в розуміння процесів геологічного формування морського дна.

В геологічній практиці під математичною моделлю зазвичай розуміють наближений опис за допомогою математичних символів будь-якого геологічного об'єкта, явища або процесу. Останній, за рахунок істотних властивостей в межах конкретних цілей моделювання, здатний замінити реальні об'єкти, явища або процеси при їх вивченні. У запропонованому визначенні відображається той очевидний факт, що при будь-якому моделюванні, в тому числі і математичному, неможливий повномасштабний опис властивостей досліджуваного об'єкта, тому він містить лише найважливіші на даному етапі моделювання властивості природних геологічних об'єктів (наприклад, щільність, швидкість звуку, згасання і ін.).

Тому актуальним є розробка аналітико-чисельних методів для визначення найбільш прийнятної математичної моделі шаруватих геологічних структур, виходячи з умови коректності відображення вибраних для цього властивостей об'єкта-оригіналу. Вирішенню цієї проблеми присвячена дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких висвітлені у дисертаційній роботі, є логічним продовженням робіт, виконаних автором згідно планових та договірних науково-дослідних робіт: «Математическое моделирование слоистых неоднородных сред с полостями простой и сложной формы» № держреєстрації 01040008326 (2004 р.); «Математическое моделирование пространственной структуры геофизических сред и оценка возмущений акустических полей, обусловленных наличием локализованных структурных аномалий» № держреєстрації 0105U004526 (2005 р.); «Математическое моделирование пространственной структуры сред с учётом геофизических полей в

нестационарной постановке» № держреєстрації 0106U005897 (2006 р.); «Создание теоретических основ моделирования пространственной структуры сред с учётом геофизических полей в нестационарной постановке» № держреєстрації 0107U004017 (2007 р.); «Исследование нелинейных (резонансных) эффектов, которые могут индуцироваться особенностями структуры дна при распространении и трансформации разномасштабных волновых возмущений» № держреєстрації 0107U00401 (2007 р.); «Исследование влияния неоднородностей (полостей и включений) геологической структуры дна на её амплитудно-частотную характеристику» № держреєстрації 0108U007120 (2008 р.); «Исследование слоистости дна с использованием сложных зондирующих сигналов для определения структуры донных отложений и водной среды» № держреєстрації 0109U003224 (2009 р.); «Создание теоретических основ и методологии моделирования гидроакустических полей геологических структур» № держреєстрації 0106U000108 (2010 р.); «Создание математической модели геологического разреза, содержащего залежи метана» № держреєстрації 0111U008905 (2011 р.); «Развитие математических моделей геологических структур, приближённых к реальной среде. Развитие алгоритмов и программного обеспечения исследования донных структур гидрогеоакустическими средствами» № держреєстрації 0112U001874 (2012 р.); «Математическое моделирование процессов определения рельефа дна гидрогеоакустическими средствами. Разработка алгоритмов и средств определения детального рельефа дна» № держреєстрації 0112U001874 (2014 р.) та мають безпосередній зв'язок з іншими виробничими та науково-дослідними роботами, що виконуються ДУ «Гідрофізичний центр НАН України».

Мета і завдання дослідження – створення аналітико-чисельних методів для моделювання шаруватих геологічних структур з порожнинами простої і складної форми.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні **задачі**:

1. Аналіз існуючих моделей реального геологічного середовища.
2. Розробити аналітико-чисельні методи моделювання структури та просторового розподілу акустичних властивостей морських відкладів, представлених шаруватим неоднорідним середовищем.
3. Розробити алгоритми отримання модельного акустичного відгуку відбиття від геологічних границь з різними коефіцієнтами відбиття.
4. Розробити систему комп'ютерного тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур.

Об'єкт дослідження - неоднорідні шаруваті донні відклади, що містять порожнини й включення.

Предмет дослідження - моделювання розподілу неоднорідностей у морському дні.

Методи дослідження. Постановка й розв'язок крайових задач для структурно-акустичних моделей дна, які містять локалізовані неоднорідності. Використання параметричних бікубічних сплайнів для моделювання поверхонь границь розділу. Багатокомпонентна фільтрація одно-, дво- або тривимірного нормального стохастичного поля просторових частот для моделювання

структурних елементів дна. Розв'язок сітчастих рівнянь на основі адаптивного модифікованого попереми́ннотрикутничого методу варіаційного типу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблено аналітико-чисельні методи моделювання структури й просторового розподілу акустичних властивостей шаруватих неоднорідних донних відкладів.

2. Реалізовано процедуру багатокomпонентної фільтрації одно-, дво- або тривимірного нормального стохастичного поля просторових частот для моделювання структурних елементів дна.

3. Створено імітаційну модель гідроакустичного ехо-сигналу, що адекватно відображає формування ехо-сигналу від шаруватих неоднорідних донних відкладів й враховує параметри випромінюючого сигналу.

4. Розроблено програмний комплекс тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур, який дозволяє створювати моделі дна, що містять включення різної форми й складу.

Достовірність отриманих експериментальних даних забезпечена використанням сучасних методів досліджень, статистичною обробкою результатів та підтверджується лабораторними та експедиційними експериментами. В процесі обробки результатів досліджень використано сучасні аналітичні інтегровані системи Matlab, QGIS. Одержані результати, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, науково обґрунтовані.

Практичне значення одержаних результатів. Використання розроблених методів дозволить підвищити точність тривимірних та двовимірних побудов складних геологічних структур на основі системи ієрархічно впорядкованих параметричних сплайнових поверхонь з розрізами. Важливими оригінальними моментами такого підходу є використання параметричних поверхонь з внутрішніми розрізами для опису геофізичних розривів і викидів, а також ієрархічне впорядкування системи геологічних границь у вигляді бінарного дерева. Тривимірні математичні моделі, побудовані на основі такого підходу, дозволяють використовувати методи оптимізації для автоматичного узгодження параметрів моделі з різнорідними геолого-геофізичними даними. Це надасть можливість вирішувати як прямі, так і зворотні задачі гідрогеоакустики, геофізики, спираючись на розроблену математичну модель геологічного середовища.

Результати роботи можуть бути використані при проведенні геологорозвідувальних робіт під час пошуків і розвідки родовищ вуглеводнів та моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем самостійно проведено всі етапи дисертаційного дослідження, зокрема збір та аналіз інформації з періодичних видань та фондових матеріалів, здійснено розробку математичного апарату та програмного забезпечення комплексу тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур. Виконано апробацію даного комплексу на реальних матеріалах науково-дослідних експедицій та модельних даних.

Дисертантом виконано апробацію створених аналітико-чисельних методів

моделювання шаруватих геологічних структур при виконанні низки науково-дослідних робіт та при проведенні науково-дослідних експедицій, де підтверджена доцільність використання створеного комплексу тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур.

Усі теоретичні і практичні результати, висновки та наукова новизна, які викладені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача у науковій праці, зазначено у списку опублікованих за темою дисертації робіт.

Особистий внесок автора в основні роботи, виконані в співавторстві, визначається наступним чином. Колективна монографія [Щипцов, 2019] - збір та аналіз матеріалів, участь у натурних випробуваннях, проведення обробки гідрогеоакустичної інформації, побудова фрагментів ізобатичних карт та цифрових моделей рельєфу, методико-методологічні основи яких використані в дисертаційній роботі. Стаття [Гончар и др., 2005] - побудова цифрової моделі дна та сполучення із супутниковою картою і прив'язкою до географічних координат під час моніторингу акваторій, проведення обробки гідрогеоакустичної інформації, методико-методологічні основи яких використані в дисертаційній роботі. Стаття [Гончар и др., 2006] - побудова цифрової моделі дна та сполучення із супутниковою картою і прив'язкою до географічних координат під час моніторингу акваторій, побудова об'ємних зображень сигналу. Стаття [Гончар и др., 2008] - збір та аналіз матеріалів, розробка моделі акустичного відгуку. Стаття [Гончар и др., 2011] – збір та аналіз матеріалів, сполучення планшету гідроакустичної зйомки зі супутниковими даними. Стаття [Гончар и др., 2013] – збір та аналіз матеріалів, розробка та аналіз системи комп'ютерного тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур, математичне моделювання геологічного середовища, наближеного до реального. Стаття [Щипцов та ін., 2019] - збір та аналіз матеріалів, обробка гідроакустичної інформації по виявленню циліндричних об'єктів. Стаття [Голодов та ін., 2019] - збір та аналіз матеріалів, безпосередня участь в морських та річкових експедиціях, обробка гідроакустичної інформації та передача її до банку океанографічних даних, побудова цифрових моделей дна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідалися і обговорювалися на вітчизняних і міжнародних наукових нарадах і конференціях, зокрема: VI Російська науково-технічна конференція «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии НО - 2007» (Державний науково-дослідний навігаційно-гідрографічний інститут МО РФ, м. Санкт-Петербург, 23-25 травня 2007 р., форма участі – публікація тез); II міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану» (Науково-технічний центр панорамних акустичних систем НАН України, м. Запоріжжя, 13-14 травня 2008 р., форма участі – публікація тез); IX Всесвітня конференція «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА - 2008» (Санкт-Петербурзький науковий центр РАН, м. Санкт-Петербург, 27-29 травня 2008 р., форма участі – публікація тез); X Всесвітня конференція «Прикладные технологии

гідроакустики и гидрофизики: ГА – 2010» (Санкт-Петербурзький науковий центр РАН, м. Санкт-Петербург, 25-27 травня 2010 р., форма участі – публікація тез); XI Міжнародна конференція «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2012» (Санкт-Петербурзький науковий центр РАН, м. Санкт-Петербург, 22-24 травня 2012 р., форма участі – публікація тез); V Всеукраїнський семінар-нарада «Морські берега України» (МГІ НАН України, смт. Кацивелі (АР Крим), 10-13 вересня 2012 р., форма участі – постерна доповідь); III міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану» (Науково-технічний центр панорамних акустичних систем НАН України, м. Запоріжжя, 14-15 травня 2013 р., форма участі – публікація тез).

Публікації. Основні результати та висновки дисертаційного дослідження, одержані автором особисто або у співавторстві та опубліковані у журналах, які входять до затвердженого МОН переліку наукових фахових видань України з наук про Землю, або іноземних виданнях. За темою дисертації опубліковано 18 наукових робіт: одна глава в колективній монографії, 7 статей у фахових наукових виданнях (1 входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science та 1 - до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus) і 10 тез доповідей на наукових конференціях різного рівня

Структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 221 сторінці машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 150 сторінок. Робота ілюстрована 4 таблицями та 117 рисунками. Список використаних джерел містить 175 найменувань.

Подяка. Я щиро вдячний першому науковому керівнику член-кореспонденту НАН України, доктору технічних наук, с.н.с. Гончару Анатолію Івановичу за постійну всебічну підтримку, допомогу та поради. Особлива вдячність науковому керівнику член-кореспонденту НАН України, доктору географічних наук, професору Щипцову Олександрові Анатолійовичу за всебічне сприяння та підтримку та надання можливості збору фактичного матеріалу для досліджень. Моя подяка також головному науковому співробітнику відділу петромагнетизму і морської геофізики Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України доктору геологічних наук, професору Володимирі Павловичу Коболеву за допомогу та поради. Висловлюю також подяку академіку НАН України, доктору геолого-мінералогічних наук, професору, раднику при дирекції ДНУ «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України» Шнюкову Євгену Федоровичу за плідну співпрацю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та завдання, методи і методику досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів, наукове та практичне значення дисертації, наведено відомості про особистий внесок здобувача, публікації, зв'язок роботи з науковими програмами, подано інформацію про результати апробації і структуру роботи.

В аналізі існуючих моделей реального геологічного середовища надана інформація щодо таких моделей як: імпедансна та пружна моделі донних відкладів, гетерогенні моделі середовищ, статистична модель донного середовища, моделі Біо та їх модифікації.

Найбільш перспективними і інтенсивно розвиваючимися методами дослідження динамічних процесів і неоднорідностей в мілководному середовищі є акустичні і сейсмоакустичні. Причина цього більшою мірою пов'язана зі швидким розвитком технічних засобів, обчислювальної техніки і методів математичної обробки.

При проведенні експериментальних досліджень щодо поширення звуку в морі практично завжди постає питання про модель акваторії, в якій проводяться вимірювання. Модель необхідна для інтерпретації отриманих результатів і для прогнозування акустичних полів будь-яких джерел звуку в цій акваторії.

Під терміном "акустичне моделювання" розуміється підбір математичної моделі адекватної району гідроакустичних вимірювань. Математична модель включає в собі два елементи:

- 1) власне модель акваторії, тобто сукупність значень параметрів, що характеризують дно, водну товщу і поверхню моря;
- 2) метод розрахунку поля (променевий, хвильовий або ін.), втілений в конкретну обчислювальну програму.

В геологічній практиці під математичною моделлю зазвичай розуміють наближений опис за допомогою математичних символів будь-якого геологічного об'єкта, явища або процесу, що містить в собі його властивості, суттєві для конкретних цілей моделювання, і, в межах даних цілей здатне замінити реальні об'єкти, явища або процеси при їх вивченні. При будь-якому моделюванні, в тому числі і математичному, неможливий повномасштабний опис властивостей досліджуваного об'єкта, тому в опис включаються лише найважливіші на даному етапі моделювання властивості природних геологічних об'єктів (наприклад, щільність, швидкість звуку, згасання і ін.).

Спочатку теоретичні моделі служили, головним чином, для фізичної інтерпретації найбільш суттєвих експериментальних закономірностей поширення низькочастотного звуку в реальних умовах. Модель ідеального хвилеводу виявилася для цього надмірним спрощенням. Перша модель неідеального хвилеводу запропонована Пекерісом.

В подальшому розвитку теорії значна увага приділялася послідовному врахуванню шаруватості водної товщі і дна. Було потрібно підвищити рівень адекватності розроблюваних моделей з метою успішного їх використання і прогнозування реальних акустичних явищ. Це відображено в роботах Хемптона Л., Бреховських Л.М., Собісевіча Л.Є.

Імпедансна і пружна моделі донних відкладів

Залежно від специфіки розв'язуваної задачі осадовий матеріал можна розглядати як рідку, тверду або гетерогенне середовище.

В акустично рідких середовищах існують тільки повздовжні хвилі P_L . Локальною характеристикою поверхні і внутрішніх границь рідкої осадової товщі

є хвильовий опір (імпеданс). Задання імпедансів на границях середовищ, в тому числі імпедансів локалізованих неоднорідностей донної структури, еквівалентно формулюванню змішаної крайової задачі, яка включає як окремі випадки задачі Діріхле ($Z=0$) і Неймана ($Z \rightarrow \infty$). Крім умов на границях, для визначення поля необхідно також використовувати умову випромінювання, що дозволяє виключити вплив нескінченно віддалених джерел поля. Представлення товщі донних ґрунтів як імпедансного середовища дозволяє будувати досить загальні акустико-структурні моделі дна з об'єктом без залучення складного і часто не виправданого в прикладному відношенні математичного апарату. Основою опису хвильових процесів в пружних (акустично твердих) середовищах є динамічні рівняння теорії в'язкопружності (рівняння Ламе).

У разі не надто високих частот відклади можуть розглядатися як деяке "ефективне" суцільне середовище, рідке або пружне, з параметрами, які можуть змінюватися в просторі. Для опису акустичних властивостей рідких відкладів достатньо двох параметрів, наприклад, щільності і стисливості, або щільності і швидкості звуку. Для пружного дна таких параметрів три: щільність і швидкості двох різних типів хвиль, подовжніх і зсувних. При цьому для врахування поглинання в середовищі швидкості поширення хвиль, а в деяких випадках і щільність, вважаються комплексними.

Гетерогенні моделі середовищ

Найбільш точно і повно акустичні властивості донних відкладів описуються моделями гетерогенних середовищ - моделлю Біо, суспензійною моделлю і іншими моделями, які є узагальненням теорії пружності на багатофазні середовища.

У моделі Біо донні відклади представляються у вигляді двофазної квазірівноважної системи - насиченого рідиною більш-менш жорсткого скелета, утвореного безліччю твердих частинок.

В такому середовищі можуть існувати хвилі трьох типів: повздовжня хвиля P_L^1 в рідині, повздовжня хвиля P_L^2 , що виникає внаслідок руху рідини відносно скелета, і поперечна хвиля P_S в скелеті.

У моделі Біо враховуються пружні властивості окремих складових відкладів і взаємодія між ними, проте врахування реального розподілу часток за діаметром можливе тільки в суспензійній моделі гетерогенного середовища. Опис поширення хвильових полів в суспензійній моделі засновано на теорії багатократного розсіяння на частинках твердої фази осадового матеріалу.

Статистична модель донного середовища

В відкладах, як суцільному середовищі, існує два основних типи нерегулярностей (збурень), які можуть бути причиною розсіювання звуку: об'ємні неоднорідності і нерівності границь. Об'ємними неоднорідностями є просторові флуктуації різних параметрів середовища щодо їх середніх значень. Нерівності можуть відноситися до різних границь - поверхні дна і внутрішнім границям розділу в товщі відкладів.

Статистична модель збурень донного середовища включає в себе просторові спектри нерівностей і об'ємних неоднорідностей осадової товщі з урахуванням

можливих взаємних кореляцій між нерівностями різних границь, а також між флуктуаціями різних параметрів середовища.

У **другому** розділі розроблені аналітико-численні 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, наявності в них порожнин і включень різних форм і властивостей.

Розроблена система комп'ютерного тривимірного моделювання геофізичних полів геологічних структур представлена на рис.1. Цей програмний комплекс дозволяє створювати моделі дна, що містять включення різної форми і складу.



Рис. 1. Блок-схема створення математичних моделей геологічних структур.

Розроблений програмний комплекс дозволяє здійснювати створення об'ємних структурних літолого-стратиграфічних чи інших моделей геологічних середовищ з переважно субгоризонтально-шаруватою будовою. При цьому можливий розрахунок і візуалізація необмеженої кількості вертикальних і горизонтальних розрізів створеної моделі (рис. 2).

Створені тривимірні моделі необхідні для моделювання панорамної зйомки (роботи гідролокаторів бокового огляду (ГБО), ГБО з інтерферометричним каналом, багатопроменевого ехолота), тривимірного профілювання, побудови ізобатичних карт за результатами ехолотних промірів.

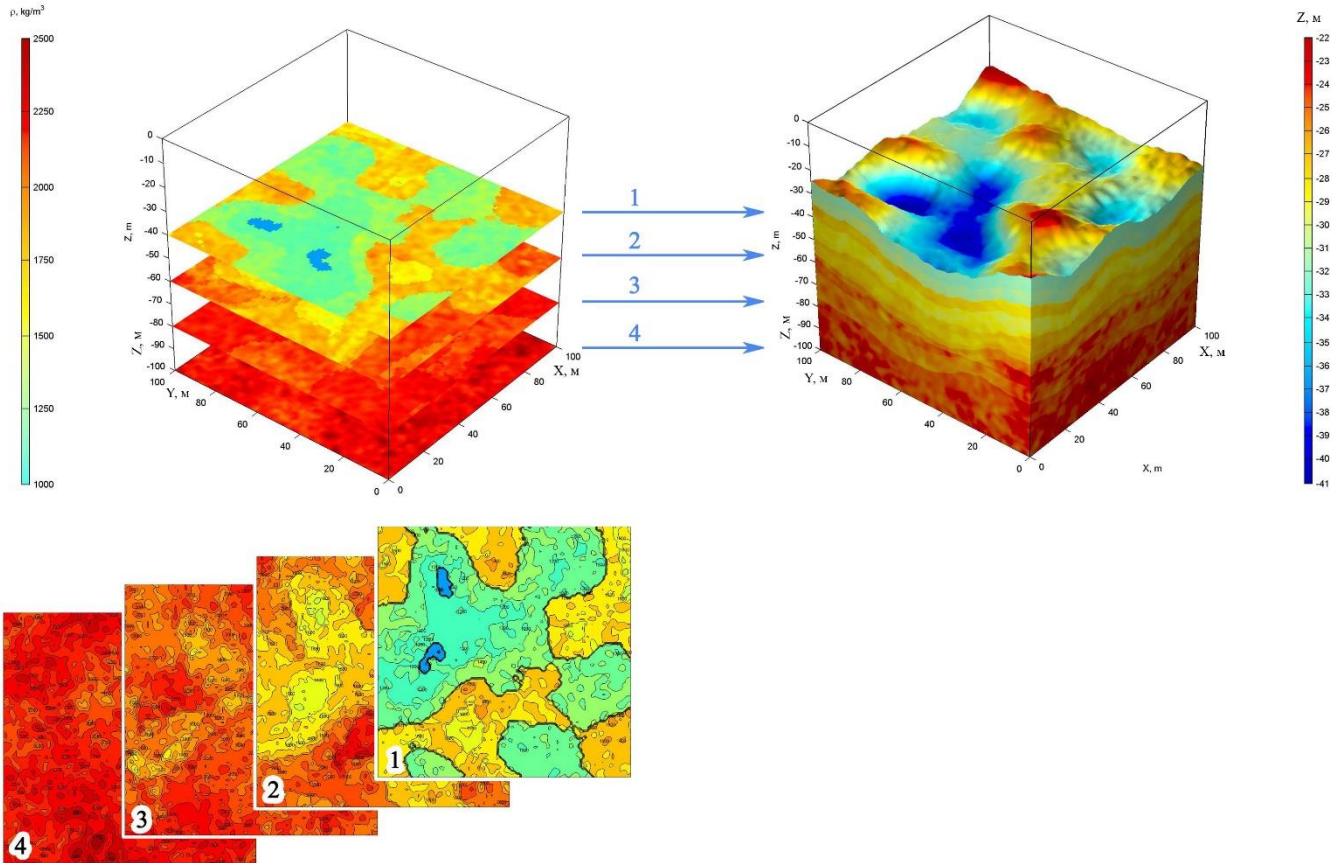


Рис. 2. Модель геологічної структури дна і її горизонтальні перетини.

Розглянемо загальні принципи моделювання реальних донних структур, які характеризуються більшою чи меншою мірою шаруватості, морфологією, а також випадковими (флуктуації властивостей) і детермінованими (локалізованими) неоднорідностями.

Можна виділити два класи модельних уявлень структурованого середовища. 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 об'ємі середовища. Такі моделі можна визначити як дискретні і безперервні відповідно.

Розглянемо побудову дискретної моделі донної структури (рис. 3).

Припустимо в системі координат (x, y, z) задана область $V = X \times Y \times Z$ донної структури. Кожен елемент $dv \in V$ дна характеризується сукупністю $\Psi(dv) = \{\rho, \varphi, \lambda, \mu, \dots\}$ взаємопов'язаних властивостей, наприклад, щільністю ρ , пористістю φ , пружними постійними Ламе λ і μ і т.д. Будемо шукати метод, який конструє масив значень $\Psi(dv \in V)$, які відповідають з необхідним ступенем точності реальній донній структурі.

Нехай в області V осадової товщі виділяються $K+1$ структурних станів Ψ_k ($k=0..K$), відповідних водному середовищу (Ψ_0) і шарам дна ($\Psi_{1..K}$). Відповідні станам Ψ_k горизонтально протяжні області (можливо, багатозв'язкові) $\Omega_k \in V$ будемо називати k -доменами. Области Ω_k в даному випадку є елементами донної структури.

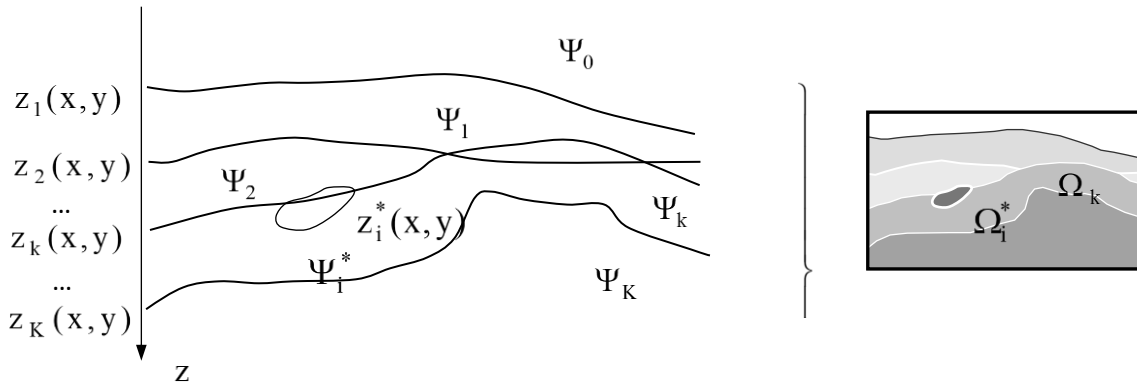


Рис. 3. Моделювання дискретної донної структури з локалізованою неоднорідністю.

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:

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

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 двовірного 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 з спектрів C_k в силу того, що зазвичай $z_k^0 \gg \delta z_k$ і $z_k^0 \gg F_2^{-1}[C_k(0,0)]$.

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:

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

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 , як впливає з (1) і (2), можуть бути описані функціями $\varepsilon_k(f_x, f_y)$.

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 $f_c(\vec{f})$, описуваних виразами

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

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

що утворюють фільтр $F(\vec{f})$ виду

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

де $w_c > 0$ - ваги субфільтрів.

Кожен субфільтр $w_c > 0$ виду (2.11) 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

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

Тому

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

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:

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

Розглянемо тепер один з можливих способів композиції синтезованих горизонтів z_k в донну структуру, тобто способів визначення властивостей будь-якого

з елементів dv шаруватого дна за заданими функціями z_k .

$$\Psi(x, y, z) = \sum_k \Psi_k U_-(z - z_k) \prod_{q>k} U_+(z_q - z). \quad (8)$$

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

$$\Psi(x, y, z) = \sum \Psi_k g_k(x, y, z), \quad (9)$$

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

$$g_k(x, y, z) = \begin{cases} 1, & z \in [z_k, z_{q>k}) \\ 0, & z \notin [z_k, z_{q>k}) \end{cases}. \quad (10)$$

Використовуючи для опису умов $z - z_k \geq 0$ і $z_{q>k} - z > 0$ 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 уявлення генератора донної структури:

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

Тоді властивості елементів осадової товщі будуть описуватися функцією:

$$\Psi(x, y, z) = \sum_k \Psi_k U_-(z - z_k) \prod_{q>k} U_+(z_q - z). \quad (12)$$

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

$$\begin{cases} \Psi(x, y, z) = \Psi_0 \\ \Psi(x, y, z + dz) \neq \Psi_0 \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} \Psi = \Psi_0 \\ \partial\Psi/\partial z \neq 0 \end{cases}. \quad (13)$$

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

Неоднорідності, локалізовані в шаруватій донній структурі, можна моделювати у вигляді i -доменів Ω_i^* , що володіють властивостями Ψ_i^* і обмежених замкнутими

поверхнями $z_i^*(x, y)$. Структура шаруватого дна, що містить безліч локалізованих неоднорідностей, буде описуватися наступним виразом:

$$\Psi(\vec{r}) = \begin{cases} \sum \Psi_k g_k(\vec{r}), & \vec{r} \in V \setminus \bigcup_i \Omega_i^* \\ \Psi_i^*, & \vec{r} \in \Omega_i^* \end{cases} \quad (14)$$

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 -доменив 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.

Розглянемо побудову безперервної моделі неоднорідної донної структури (рис. 4).

Нехай 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.

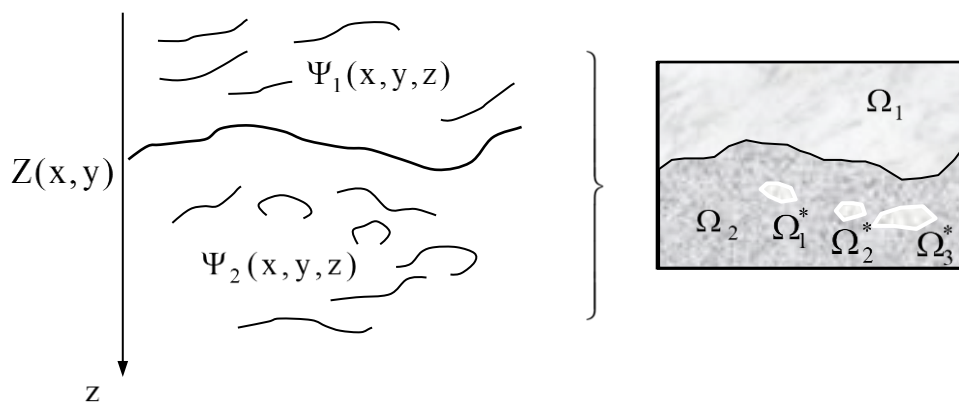


Рис. 4. Моделювання безперервної донної структури і виділення в ній неоднорідностей.

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):

$$\Psi(x, y, z) = \Psi_1(x, y, z)U_-(z)U_+[Z(x, y) - z] + \Psi_2(x, y, z)U_-[z - Z(x, y)], \quad (15)$$

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 (15) зручно задавати в такій формі:

$$\begin{aligned} Z(x, y) &= z^0 + \delta z(x, y) = z^0 + F_2^{-1}[C_z(f_x, f_y)]; \\ \Psi_q(x, y, z) &= \psi_q^0 + \delta \psi_q^0(x, y, z) = \psi_q^0 + F_3^{-1}[C_q(f_x, f_y, f_z)], \quad q = 1, 2. \end{aligned} \quad (16)$$

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 $\delta \psi_q^0(x, y, z)$ середні властивості ψ_q^0 напівпросторів Ω_q задають їх внутрішні особливості. Різномасштабні морфологічні та структурні збурення середовищ можна задавати за допомогою дво- 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, змодельованого викладеним способом, виділяються за локальними максимумами поля $|\vec{\nabla}\Psi(x, y, z)|$.

Реальні донні структури завжди будуть відрізнятися від структур, одержуваних в рамках дискретної і безперервної моделей. Можна лише говорити про ступінь наближення модельних представлень 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. Більш 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, і в рамках створених моделей визначати відгук середовища на зовнішній вплив.

Третій розділ присвячений створенню математичної моделі гідроакустичного поля від геологічних структур.

У дослідженнях, пов'язаних з розробкою і створенням нових моделей гідроакустичних засобів освітлення підводної обстановки, виникає необхідність проведення чисельного моделювання роботи даних засобів. У подібних випадках часто виникають труднощі через високу вартість і трудомісткість організації та проведення натурних спостережень для надання реальної гідроакустичної інформації. Ці особливості гідроакустичних спостережень є спонукальним мотивом до створення різного роду імітаційних моделей і імітаторів гідроакустичного ехо-сигналу і викликають необхідність диференційованого підходу до повноти опису фізичних процесів, що відбуваються при формуванні ехо-сигналу в конкретній обстановці.

Існуючі в даний час методи моделювання ехо-сигналу можна розділити на

детермінований метод, і, відповідно клас детермінованих моделей, статистичний метод, і, відповідно клас статистичних моделей. Для детермінованих моделей характерна наявність заданого поточного стану спостережуваних об'єктів і відомих залежностей їх відбивних характеристик. Статистичне моделювання використовується в разі, коли відбивні властивості спостережуваних об'єктів мають випадковий характер або в складі ехо-сигналу присутні перешкоджаючі компоненти.

Є також градація моделей, яка впливає з методологічних відмінностей в рішенні хвильового рівняння. Теоретично точні моделі головним чином призначені для вирішення задач розсіювання полів на тілах найпростішої форми. При аналізі полів об'єктів складної форми застосовуються різні спрощення і допущення при вирішенні рівнянь. Поєднання цих наближень і очевидний фізичний сенс акустичних процесів і визначає групу фізичних моделей.

Коротко розглянемо створення математичної моделі акустичного поля від системи шарів при вертикальному зондуванні.

Розглянемо середовище (рис. 5), що складається з n шарів, укладених між водним напівпростором з параметрами $\rho_0 c_0$ і підстеляючим напівпростором з параметрами $\rho_{n+1} c_{n+1}$.

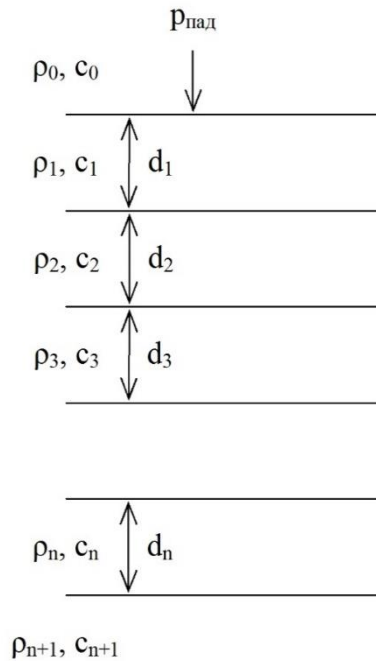


Рис. 5 Визначення коефіцієнтів відбиття і проходження від системи шарів.

Коефіцієнт відбиття від верхньої границі N -го шару відносно верхньої границі першого дорівнює

$$V_{N0} = V_{N,N-1} e^{-2\beta_0 H} \left[\prod_{i=1}^{N-1} (1 - V_{i,i-1}^2) e^{-2\beta_i d_i} \right]. \quad (17)$$

коефіцієнти $V_{i,i-1}$ розраховуються за формулою $V = \frac{m \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$ поклавши в ній $\theta=0$.

Запишемо акустичний тиск ехо-сигналу відбитого від шаруватого дна, що

складається з N шарів, на вході антени

$$p_{omp} = V_{10} e^{-2\beta_0 H} p_{uzl}(t - 2c_0 H) + e^{-2\beta_0 H} \sum_{N=2}^{n+1} \left\{ V_{N,N-1} \left[\prod_{i=1}^{N-1} (1 - V_{i,i-1}^2) e^{-2\beta_i d_i} \right] p_{uzl} \left(t - 2c_0 H - 2 \sum_{i=1}^{N-1} c_i d_i \right) \right\} + p_N \quad (18)$$

де p_N - тиск на антені створюваний шумом; p_{uzl} - зондуєчий сигнал, який може бути як простим, так і складним.

Існує інший спосіб, що дозволяє розрахувати відбитий сигнал від шаруватого неоднорідного дна. Модельний акустичний відгук є суперпозицією всіх акустичних сигналів, відбитих від геологічних границь, що мають різні коефіцієнти відбиття. Акустичний відгук може бути описаний так званою згортковою моделлю

$$p_{omp} = p_{uzl} t \otimes V t + p_N, \quad (19)$$

де $V(t)$ - імпульсна характеристика середовища, що визначається послідовністю коефіцієнтів відбиття від усіх границь. $V(t)$ це трансформовані в часовий масштаб коефіцієнти $V_{N,0}$.

Трансформацію в часовий масштаб і згортку (19) можна робити з маленьким кроком дискретизації. Тоді рівняння (19) являє собою фільтрацію імпульсної характеристики середовища. Фільтром, який визначає зміну частотного діапазону відгуку, є акустичний сигнал джерела. При моделюванні акустичний сигнал джерела може бути розрахований аналітично або виділений з реального хвильового поля.

Розрахунок гідроакустичного відгуку за формулою (19) проводиться набагато швидше, ніж за (18), тому що згортку можна виконувати не в часовій області, а в частотній, використовуючи швидке перетворення Фур'є. Однак формула (18) має наглядніший вид формування відбитого сигналу від геологічної структури дна.

На рис. 6 представлені створена математична модель дна, що представляє вертикальний зріз геологічної структури та розрахунок відбитого акустичного хвильового поля, що реєструється антеною при вертикальному профілюванні.

При розрахунку профілограми використовувалися наступні параметри випромінюючого імпульсу: частота $f = 3$ кГц, тривалість $\tau = 3$ мс, період зондування $T = 1,333$ с, амплітуда дорівнювала одиниці.

На моделі донних відкладів проведені чисельні експерименти з виявлення тонкої структури донних відкладів при використанні в якості зондуєчого імпульсу складних сигналів, що і представлено рис. 7-8.

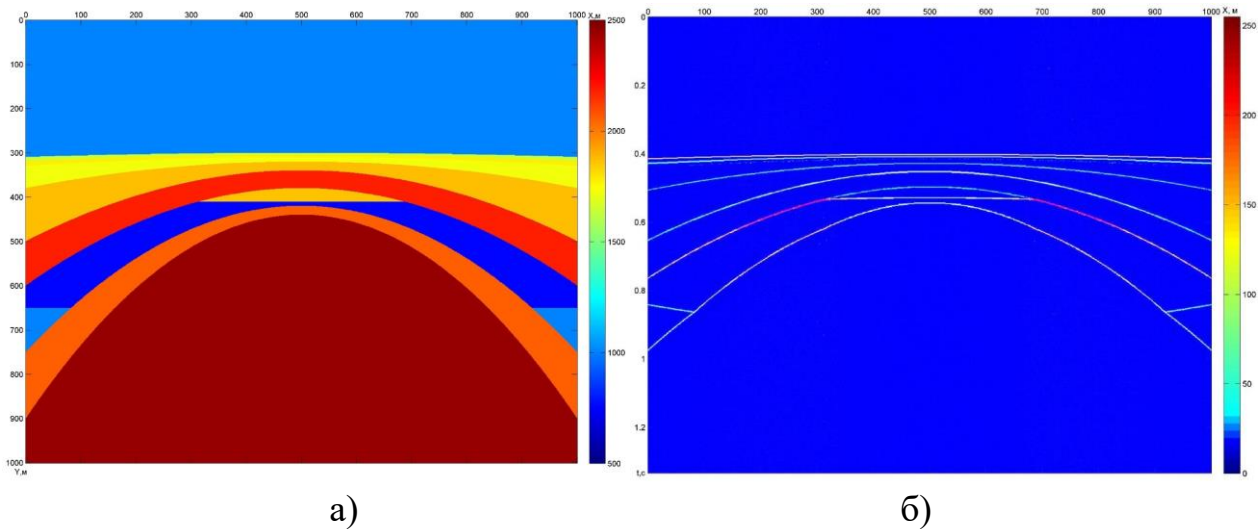


Рис. 6. Математична модель геологічної структури а) та розрахункова профілограма б).

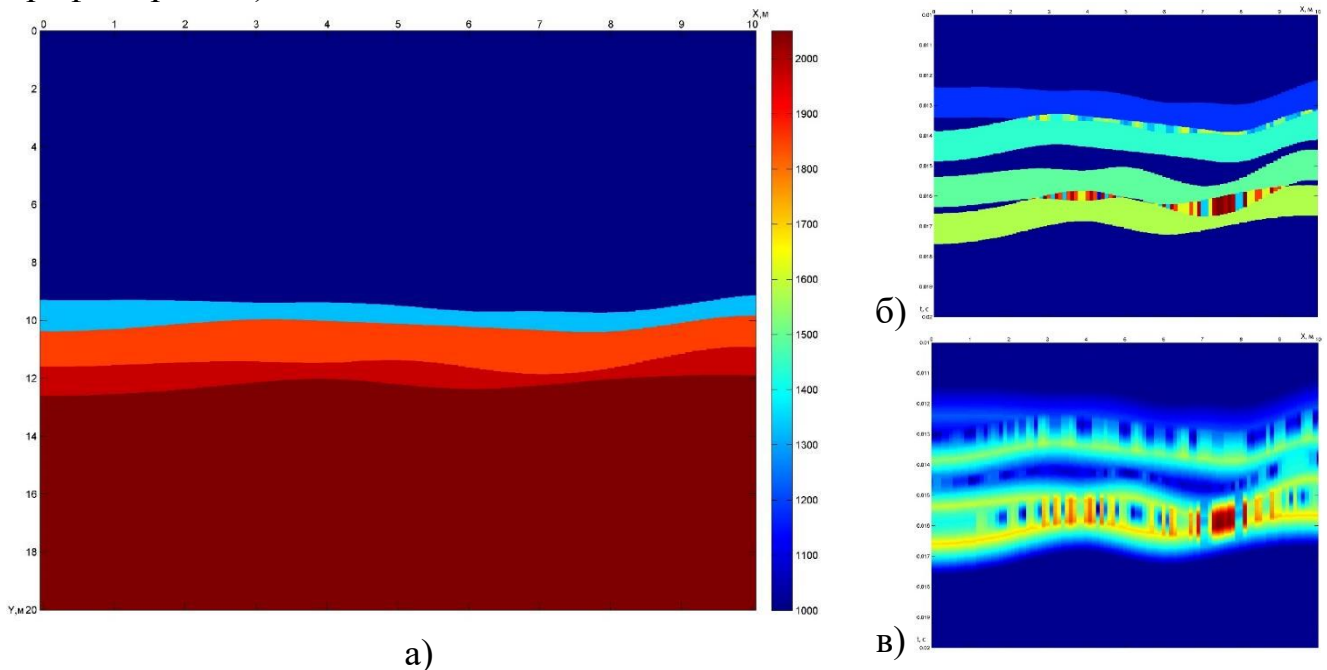


Рис. 7. Модель вертикального зрізу донних відкладів а) та профілограми, отримана при використанні тонального сигналу тривалістю $\tau=1$ мс: б) не оброблена, в) оброблена.

На рис. 7а) представлена модель вертикального зрізу шаруватої тонкої структури морського дна. Вона складається з тонких шарів. Товщина шарів менше, ніж розрізнявальна здатність ($c\tau/2$) при використанні тонального імпульсу з тривалістю $\tau=1$ мс. Це найменша тривалість, яку можна використовувати для тонального сигналу з частотою заповнення 10 кГц. На рис. 7 б), в) - профілограма від нього при тональному зондуванні.

На рис. 8 профілограми отримані при використанні лінійно-частотно-модульованого (ЛЧМ) сигналу і коду Баркера. Як показало чисельне моделювання, перспективними типами зондуючих імпульсів для профілювання тонкої структури донних відкладень, є сигнали ЛЧМ і код Баркера (фазоманіпульований сигнал). Більш

проста апаратна реалізація ЛЧМ сигналу робить його більш доступним для реалізації профілювання тонкої структури донних відкладів. Однак, у зв'язку з розвитком технологій, розробку і створення профілографа з кодом Баркера необхідно виділити в окремий і перспективний напрямок. Слід так само відзначити, що актуальним питанням є цифрова реєстрація повного сигналу, яка відкриває можливість використання додатково до потужності (амплітуди) також спектральних характеристик відбитих сигналів для дослідження структури морського ґрунту.

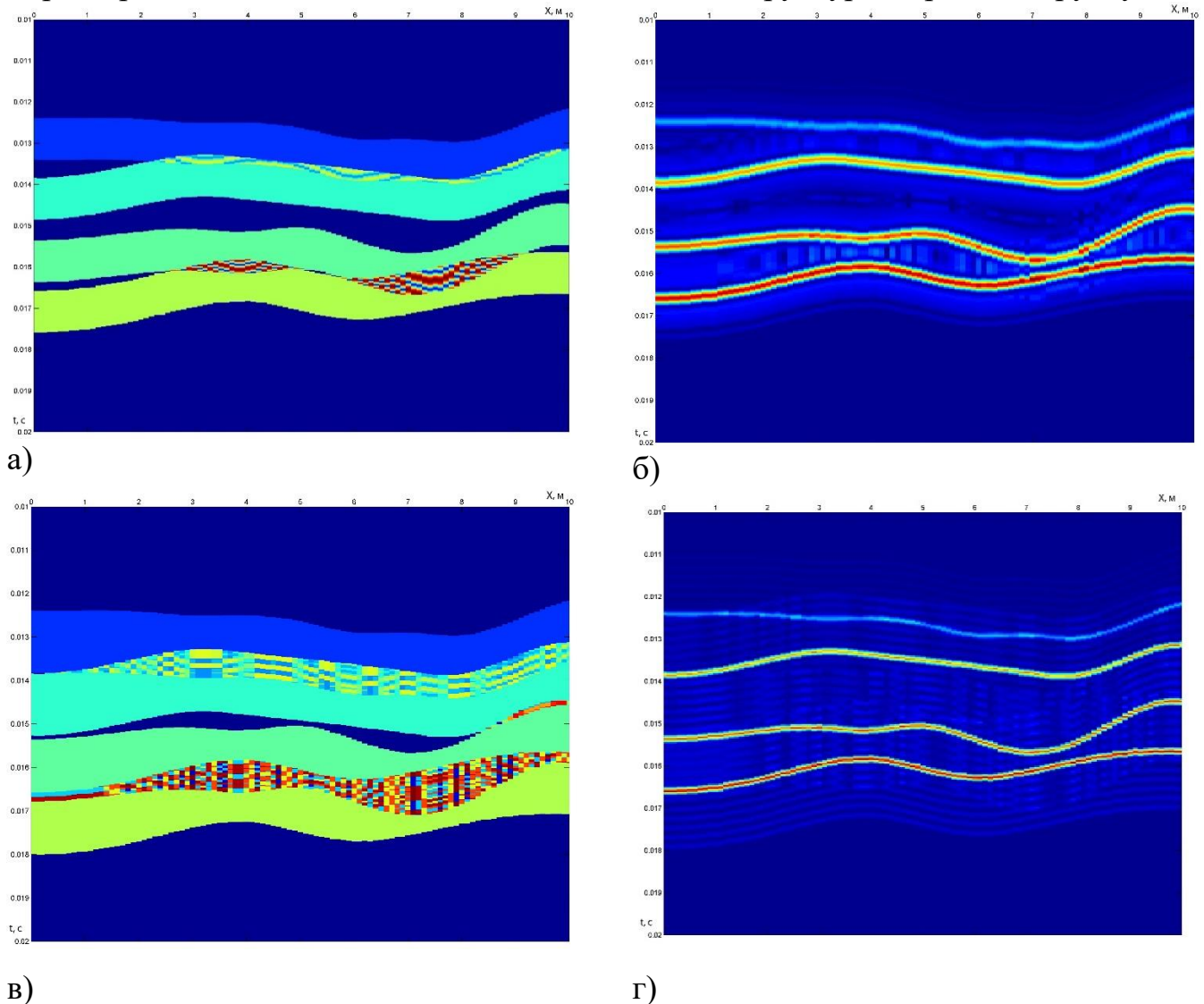
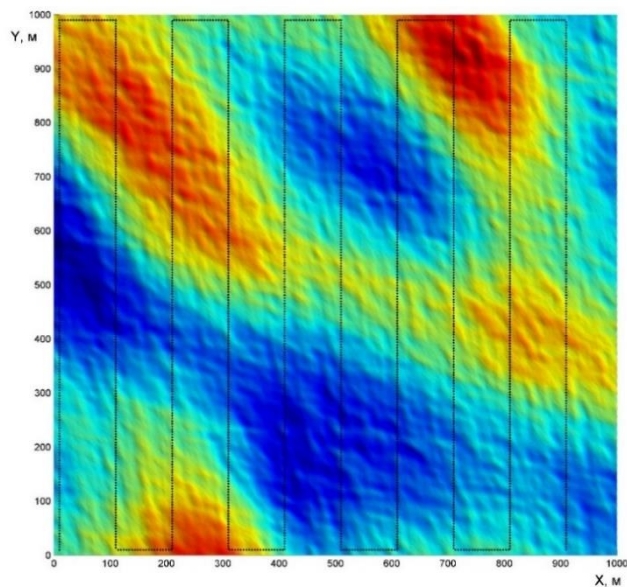


Рис. 8. Профілограми, отримані при використанні ЛЧМ сигналу тривалістю $\tau=1$ мс: а) не оброблена, б) оброблена. Профілограми, отримані при використанні коду Баркера з тональним заповненням тривалого $\tau=0,1$ мс: в) не оброблена, г) оброблена.

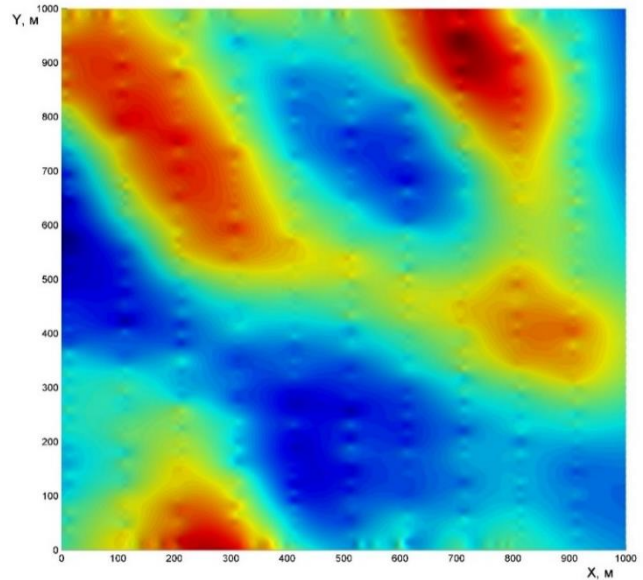
Таким чином, цей розділ дисертаційної роботи присвячений розробці теоретичних основ і методології моделювання гідроакустичних полів геологічних структур. Створено математичну модель гідроакустичного відгуку, зареєстрованого на антені при профілюванні донних структур, використовуючи в якості зондуючого сигналу сигнал будь-якої складності. Показано, що для визначення тонкої структури донних відкладів найкраще підходить фазоманіпульований сигнал Баркера, який складається з коротких імпульсів з тональним заповненням, або ЛЧМ сигнали.

У четвертому розділі виконано математичне моделювання процесів визначення рельєфу дна такими засобами як ехолот, багатопроменевий ехолот (БПЕ) і інтерферометр. Для моделювання процесів визначення рельєфу дна, змодельований рельєф розміром 1000x1000 м з середньою глибиною $z=20$ м і середньоквадратичним відхиленням $\sigma=5$ м, який представлений на рис. 9 а).

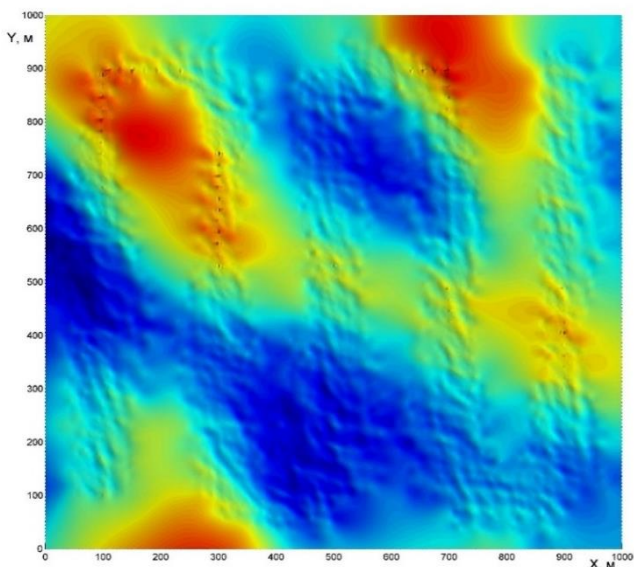
Рухаючись по заданому галсу, моделюємо роботу ехолота, БПЕ і інтерферометра, визначаємо за їх допомогою координат і глибини. Створивши координатну сітку з необхідним кроком, дані інтерполюються на неї і в результаті отримуємо відновлений рельєф. На рис. 9 б)-г) представлений результат відновлення рельєфу за допомогою БПЕ і фазового ГБО.



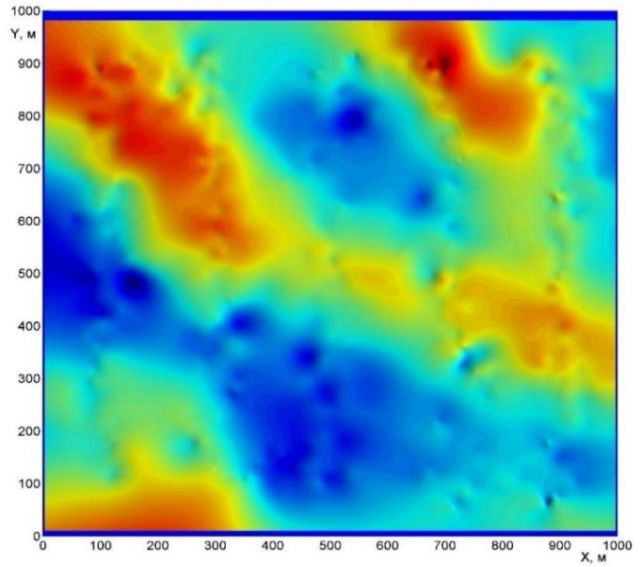
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Модель рельєфу дна - а), рельєф, відновлений за даними ехолоту - б), рельєф, відновлений за модельними даними багатопроменевого ехолота - в), відновлений рельєф за даними фазового ГБО - г).

Чисельний експеримент показав, що за даними ехолота відновлюється тільки макро-рельєф, а за даними БПЕ і фазового ГБО ще й мікро-рельєф. БПЕ і фазовий ГБО є найбільш продуктивними засобами обстеження рельєфу дна, через те що вони визначають глибину в стороні від судна.

За допомогою розробленого програмного комплексу створена цифрова модель рельєфу та ізобатична карта, обстеженої ділянки р. Дніпро за даними ехолота (рис. 10) та відновлено рельєф окремої акваторії Чорного моря за даними ГБО-500М (рис. 11).

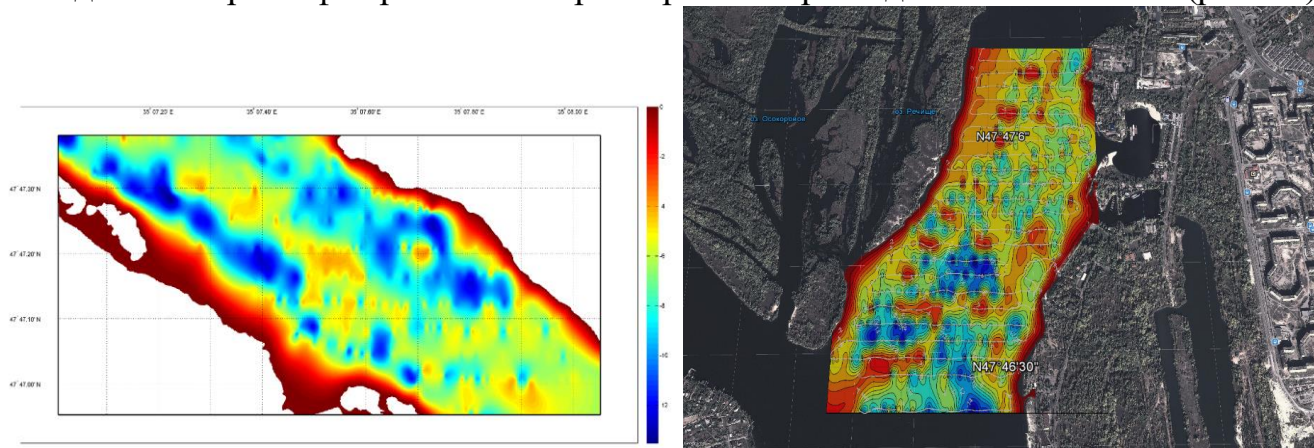


Рис. 10. Рельєф, обстежених ділянок р. Дніпро, відновлений за реальними даними ехолота ЕМ-100.

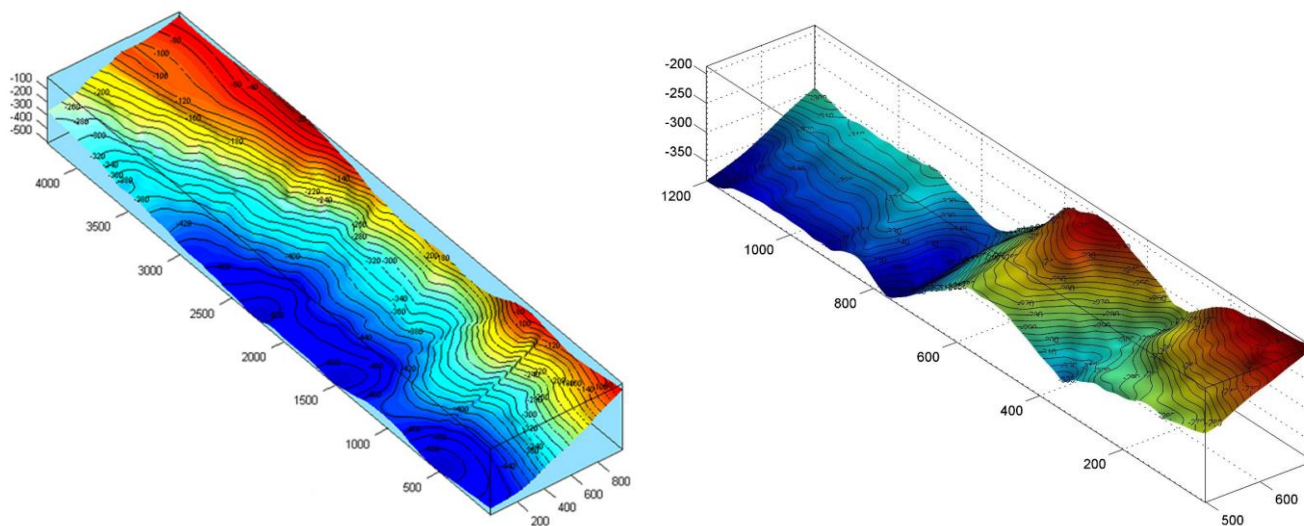


Рис. 10. Рельєф, обстежених ділянок Чорного моря, відновлений за реальними даними ГБО-500М.

Державна установа «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 створеного програмного комплексу моделювання геофізичних полів геологічних структур.

За допомогою сучасного вітчизняного гідроакустичного комплексу проведено площадну гідроакустичну зйомку дна та водної товщі обстежених районів, що дало змогу виявити та дослідити затоплені об'єкти природнього та техногенного походження.

В результаті комплексного дистанційного гідроакустичного вивчення рельєфу дна та донних відкладів за площею та розрізненням, за характеристиками відбитих

сигналів проведено вивчення гідрофізичних та геофізичних параметрів (геоакустичні характеристики та літологічні типи донних відкладів, зворотна та об'ємна реверберація водної товщі) обстежених районів акваторій, в тому числі підхідних каналів та гідротехнічних споруд.

Використовуючи програмне забезпечення розроблене в ДУ «Гідрофізичний центр НАН України» та сучасні GIS-систем були побудовані відповідні математичні моделі дна. Отримані геофізичні параметри було упорядковано та передано до гідрографічного фрагмента бази океанографічних даних (БОД) для подальшого збереження та аналізу, з метою створення можливості постійного моніторингу акваторій, які досліджувалися.

На рис. 11-13 представлені приклади побудованих цифрових моделей рельєфу дна окремих акваторій за розробленими алгоритмами, дисертаційної роботи з використання сучасних GIS-систем.

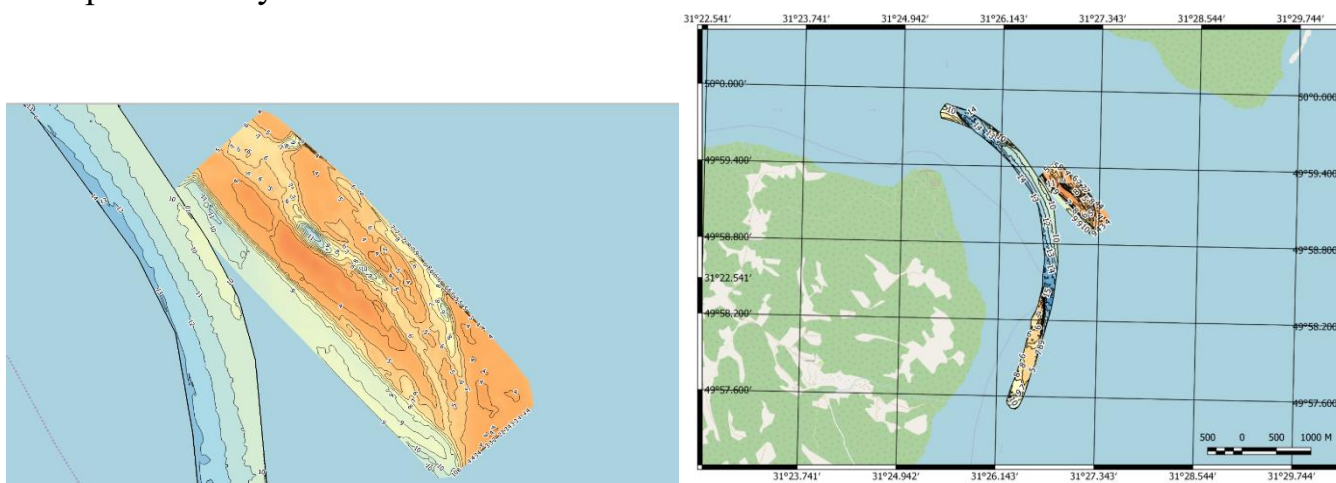


Рис. 11. Цифрова модель рельєфу, обстеженої ділянки поблизу м. Переяслав-Хмельницький за даними досліджень Канівського водосховища в науково-дослідній експедиції «Дніпро-2018».

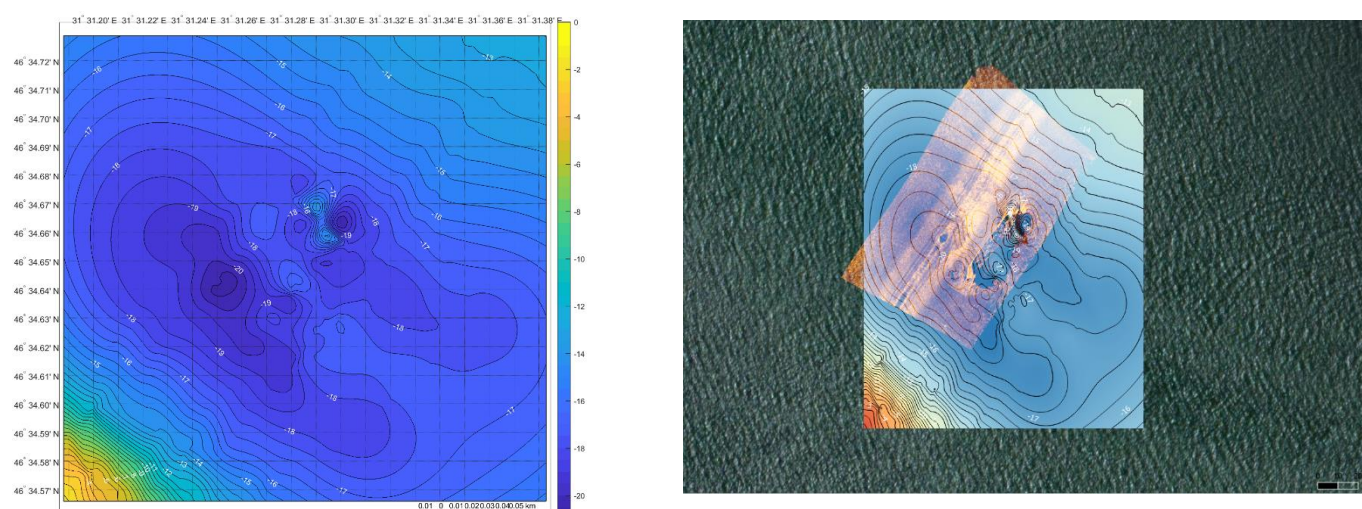


Рис. 12. Цифрова модель рельєфу дна в акваторіях Бузько-Дніпровсько-Лиманського каналу у експедиції «Чорне море 2019 (БДЛК)» та поєднання цієї моделі з супутниковою картою та гідролокаційним зображенням за допомогою GIS-технологій.

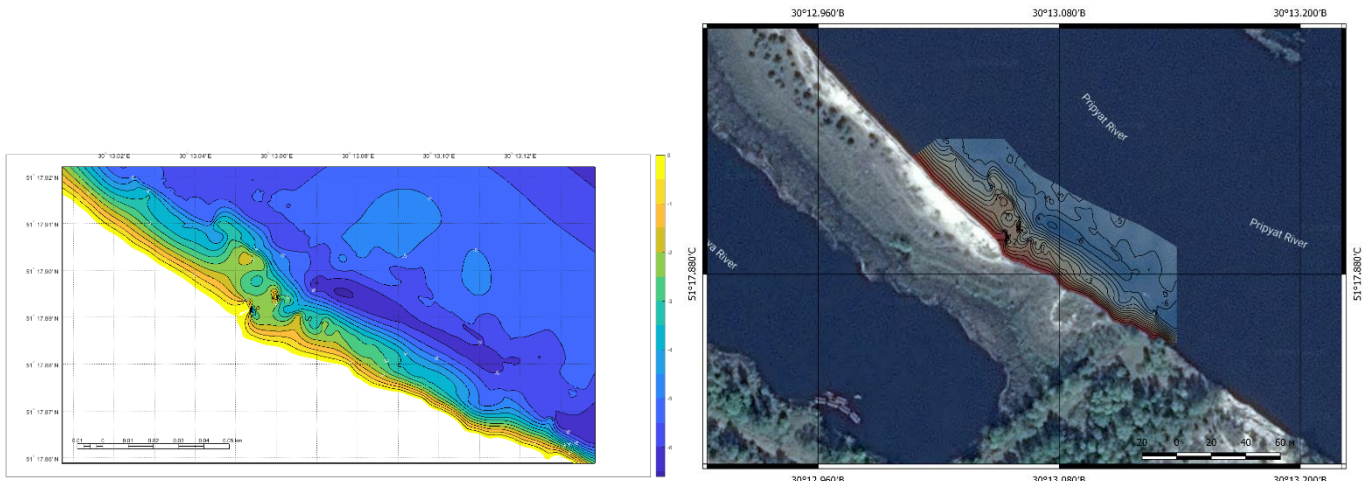


Рис. 13 Цифрова модель рельєфу дна на ділянці р. Прип'ять в експедиції «Прип'ять 2019» та поєднання цієї моделі зі супутниковою картою за допомогою GIS-технологій

Гідрофізична інформація, яка доповнила БОД, дозволяє проводити комплексну порівняльну оцінку геоморфологічних та літологічних особливостей р. Дніпро, р. Дунай та Чорного моря як єдиної екосистеми.

Отримані гідроакустичні дані та побудовані відповідні геоморфологічні інформаційні моделі дна з урахуванням їх структурних і літологічних характеристик доповнили гідрографічний фрагмент (морський модуль) банку цифрових океанографічних даних НАН України в інтересах підвищення ефективності навігаційно-гідрографічного забезпечення судноплавства, а також з метою обміну інформацією між установами НАН України та іншими організаціями.

Весь ілюстративний матеріал – авторський.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі створенні аналітико-чисельні методи для моделювання шаруватих геологічних структур з порожнинами простої й складної форми. Основні отримані результати представлено у коротких висновках після кожного розділу та на їх основі викладено нижче остаточні висновки.

1. Вперше розроблені аналітико-чисельні методи математичного моделювання структури та просторового розподілу акустичних властивостей морських відкладів, представлених як шарувате неоднорідне середовище. Ці 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. Реалізована процедура багатокомпонентної фільтрації одно-, дво- або тривимірного нормального стохастичного поля просторових частот для моделювання структурних елементів дна. Різні параметри спектральної фільтрації дозволяють створювати моделі донних структур з широким діапазоном шорсткостей поверхонь донних шарів, взаємною кореляцією їх форми, одночасно синтезуючи різномасштабні за розміром і розподілом в просторі неоднорідності.

3. Розроблено алгоритми отримання модельного акустичного відгуку, який є

суперпозицією всіх акустичних сигналів, відбитих від геологічних границь, які мають різні коефіцієнти відбиття. Акустичне відбиття описується так званою згортковою моделлю.

4. Розроблено математичний апарат і реалізовано програмне забезпечення для моделювання математичних моделей шаруватих геологічних структур, наближених до реального геосередовища

5. Проаналізовано результати математичного моделювання процесів визначення рельєфу дна такими засобами як ехолот, багатопроменевий ехолот і інтерферометр, побудована цифрова модель рельєфу та ізобатична карта обстеженої ділянки р. Дніпро за даними ехолота. Згідно з реальними даними ГБО-500М було відновлено рельєф окремої акваторії Чорного моря.

Розроблене в ДУ «Гідрофізичний центр НАН України» програмне забезпечення, разом з сучасними ГС-технологіями, апробовано в 7 науково-дослідних експедиціях. За результатами цих експедицій побудовані цифрові моделі рельєфу дна р. Дніпро поблизу м. Переяслав-Хмельницький, р. Прип'ять, в акваторіях Бузько-Дніпровсько-Лиманського каналу, а отримані геофізичні параметри було упорядковано та передано до БОД для подальшого збереження та аналізу, з метою створення можливості постійного моніторингу акваторій, які досліджувалися та підвищення ефективності навігаційно-гідрографічного забезпечення судноплавства, а також з метою обміну інформацією між установами НАН України та іншими організаціями. Проведені дослідження мають науково-технічне і прикладне значення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Чорнобильська зона відчуження: комплексна річкова науково-дослідна експедиція «Прип'ять -2019»: О.А. Щипцов, О.Ю. Берестецький, О.М. Галущенко, М.Ф. Голодов, А.Ю. Гордєєв, А.В. Варуха, С.Г. Стефанов, О.Г. Тищенко, С.А. Хмельницький, С.Г. Федосєєнков, О.І. Шундель, О.О. Щипцов За ред. чл.-кор. НАН України О.А. Щипцова. Київ: Держгідрографія, 2019. 128 с.

Статті в наукових фахових виданнях України:

2. Гончар А.И., Донченко С.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Автоматизированный многофункциональный комплекс мониторинга акваторий. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2005. №13. С. 406-411.

3. Гончар А.И., Донченко С.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Использование гидроакустических технологий для экологического мониторинга акваторий. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2006. №14. С.164-170

4. Гончар А.И., Донченко С.И., Нестеренко Л.В., Шундель А.И. Моделирование акустического отклика от геологической среды. *Геоинформатика*. 2008. №3. С. 21-23

5. Гончар А.И., Федосєєнков С.Г., Шундель А.И., Худоконь В.В., Сафонов А.В. Совмещение планшета панорамного гидроакустического комплекса со спутниковой картой. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. С.117- 121

6. Гончар А.И., Шундель А.И., Федосєєнков С.Г. Некоторые аспекты создания

структурных моделей неоднородного слоистого дна. *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2013. Вип. 27. С. 151-155.

7. Щипцов О.А., Федосеенков С.Г., Шундель О.И. Теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження виявлення циліндричних об'єктів гідроакустичними засобами. *Геоінформатика*. 2019. №4(72). С.96-105 (Index Copernicus International, Google Scholar)

8. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Нестеренко Л.В., Тимченко Ю.А., Федосеєнков С.Г., Шундель О.И., Щипцов О.А., Щипцов О.О. Океанографічні дослідження морського та річкового середовища. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 6. С. 111-127 (Web of Science).

Тези доповідей і матеріали конференцій

9. Гончар А.И., Донченко С.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Использование свёртки при обработке гидролакационной информации ГБО. *Современное состояние и проблемы навигации и океанографии: труды VI Российской научно-технической конф. НО-2007. 23-25 мая 2007 г. Санкт-Петербург. Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт МО РФ, 2007. С. 345-349*

10. Гончар А.И., Донченко С.И., Клипилин Г.И., Шундель А.И. Получение профилограмм от слоистой модели морского дна. *Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: сб. докладов второй междунар. научно-практической конф. 13-14 мая 2008 г. Запорожье. Научно-технический центр панорамных акустических систем, 2008. С. 255-263*

11. Клипилин Г.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Моделирование и обработка сигналов гидролокатора бокового обзора, использующего частотную модуляцию в режиме непрерывной посылки. *Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: сб. докладов второй междунар. научно-практической конф. 13-14 мая 2008 г. Запорожье. Научно-технический центр панорамных акустических систем, 2008. С. 264-274*

12. Гончар А.И., Донченко С.И., Нестеренко Л.В., Шундель А.И. Моделирование профилограмм от слоистой модели морского дна, содержащей крупномасштабные включения. *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды IX Всемирной конф. ГА – 2008. 27-29 мая 2008 г. Санкт-Петербург: Президиум РАН, 2008. С. 124-127*

13. Гончар А.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И., Федосеенков С.Г. Построение планшета обследованных акваторий по данным панорамного акустического комплекса (ПАК). *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды X Всероссийской конф. ГА – 2010. 25-27 мая 2010 г. Санкт-Петербург: Президиум РАН, 2010. С. 78-80.*

14. Гончар А.И., Голод О.С., Федосеенков С.Г., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Вероятностная оценка послойного определения литологических свойств донных отложений в профилограммах. *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XI Всероссийской конф. ГА-2012. 22–24 мая 2012 г. Санкт-Петербург: Президиум РАН, 2012. С. 265-268.*

15. Гончар А.И., Федосеенков С.Г., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Обследование

прибрежних акваторій гідроакустическими засадами. *Морские берега Украины: V Всеукраинский семинар-совещание, 10-13 сентября 2012 г. пгт. Кацевели: МГИ НАН Украины, 2012.*

16. Гончар А.И., Федосеенков С.Г., Шундель А.И. Цифровое моделирование параметрического профилографа. *Проблемы, методы и средства исследования Мирового океана: сб. докладов третьей междунар. науч.-практ. конф., 14-15 мая 2013 г. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. С. 65-78.*

17. Гончар А.И., Федосеенков С.Г., Шундель А.И. Математическое моделирование спектрального метода определения коэффициентов затухания и отражения для многослойных водонасыщенных донных отложений. *Проблемы, методы и средства исследования Мирового океана: сб. докладов третьей междунар. науч.-практ. конф., 14-15 мая 2013 г. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. С. 193-204.*

18. Гончар А.И., Попова Т.А., Федосеенков С.Г., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Геоакустические методы исследования дна. *Проблемы, методы и средства исследования Мирового океана: сб. докладов третьей междунар. науч.-практ. конф., 14-15 мая 2013 г. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. С. 299-309.*

АНОТАЦІЯ

Шундель О.І. Розробка математичної моделі шаруватого неоднорідного середовища як складової частини банку океанографічних даних. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – «геофізика». – Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України». – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, 2021.

В дисертаційній роботі розроблені та реалізовані аналітико-чисельні методи для моделювання шаруватих геологічних структур з порожнинами простої та складної форми. Виконано аналіз існуючих моделей реального геологічного середовища, надана інформація щодо таких моделей як: імпедансна та пружна моделі донних відкладів, гетерогенні моделі середовищ, статистичні моделі донного середовища, моделі Біо та їх модифікації. Розроблені 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. Розроблено алгоритми отримання модельного акустичного відгуку, який є суперпозицією всіх акустичних сигналів, відбитих від геологічних границь, які мають різні коефіцієнти відбиття. Акустичне відбиття описується так званою згортковою моделлю. Виконано математичне моделювання процесів визначення рельєфу дна такими засобами, як ехолот, багатопробеневий ехолот і інтерферометр. За допомогою розробленого програмного комплексу створено цифрові моделі рельєфу та ізобатичні карти окремих обстежених акваторій за алгоритмами, які описані у даній дисертаційній роботі та з використання сучасних GIS-систем.

Ключові слова: просторовий спектр, донні відклади, перетворення Фур'є, ехолот, геоакустичні параметри донних відкладів, границя розділу, GIS-технології.

АННОТАЦІЯ

Шундель А.И. Разработка математической модели слоистой неоднородной среды как составной части банка океанографических данных. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 - «геофизика». - Государственное учреждение «Научный гидрофизический центр Национальной академии наук Украины». – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2021.

Современный повышенный интерес к континентальному шельфу повышает требования к детализации его акустического описания и к уровню физической адекватности последнего. В то же время с появлением современных высокопроизводительных вычислительных машин возможности моделирования гидроакустических явлений в мелкой воде существенно расширились. В геологической практике под математической моделью обычно понимают приближенное описание с помощью математических символов любого геологического объекта, явления или процесса. Моделирование в большинстве случаев достаточно длительный итерационный процесс и выбирается наиболее приемлемая математическая модель, исходя из условия, насколько корректно она отражает выбранные для моделирования свойства объекта-оригинала.

В ходе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих моделей реальной геологической среды;
2. Разработать аналитико-численные методы моделирования структуры и пространственного распределения акустических свойств морских отложений, представленных как слоистая неоднородная среда;
3. Разработать алгоритмы получения модельного акустического отклика отражения от геологических границ, которые имеют разные коэффициенты отражения;
4. Разработать систему компьютерного трехмерного моделирования геофизических полей геологических структур.

Завершив диссертационную работу, получены следующие результаты. Разработаны и реализованы аналитико-численные методы для моделирования слоистых геологических структур с полостями простой и сложной формы. Выполнен анализ существующих моделей реальной геологической среды, представлена информация о таких моделях как: импедансная и упругая модели донных отложений, гетерогенные модели сред, статистические модели донных сред, модели Био и их модификации. Разработаны аналитико-численные методы математического моделирования структуры и пространственного распределения акустических свойств морских отложений, представленных как слоистая неоднородная среда. Разработанные методы позволяют создавать дискретные, непрерывные или смешанные структурно-акустические модели неоднородного морского дна, с учетом расслоения, флюидо- и газонасыщенных донных отложений, наличие в них полостей и включений различных форм и свойств. Разработаны алгоритмы получения модельного акустического отклика, который является суперпозицией всех акустических сигналов, отраженных от геологических границ, которые имеют разные коэффициенты отражения. Акустическое отражение описывается

так называемой сверточной моделью. Выполнено математическое моделирование процессов определения рельефа дна такими средствами, как эхолот, многолучевой эхолот и интерферометр. С помощью разработанного программного комплекса созданы цифровые модели рельефа и изобатические карты отдельных обследованных акваторий по алгоритмам, которые описаны в данной диссертационной работе и с использованием современных GIS-систем.

Проведенные совместные комплексные гидрографические и гидроакустические исследования в 2018-2019 гг. обеспечили получение современных уникальных данных, которые внесены в гидрографического фрагмента БОД с целью создания возможности постоянного мониторинга акваторий, которые исследовались и повышения эффективности навигационно-гидрографического обеспечения судоходства.

Проведенные исследования имеют научно-техническое и прикладное значение.

Ключевые слова: пространственный спектр, донные отложения, преобразования Фурье, эхолот, геоакустические параметры донных отложений, граница раздела, GIS-технологии.

ABSTRACT

Shundel O.I. Development of a mathematical model of a layered heterogeneous medium as an integral part of the oceanographic data bank. – On the rights of manuscripts.

The thesis for a Ph.D. degree in physical and mathematical sciences in specialty 04.00.22 - "geophysics". - State institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine". - S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Analytical and numerical methods for modelling layered geological structures with cavities of simple and complex form have been developed and implemented in the thesis work. Existing models of the real geological environment have been analyzed, and information on such models as impedance and resilient models of sediments, heterogeneous models of media, statistical models of bottom media, models of Bio and their modification has been presented. Analytical-numerous methods have been developed for mathematical modelling of the structure and spatial distribution of acoustic properties of marine sediments, represented as layered heterogeneous medium. The methods developed make it possible to create discrete, continuous or mixed structural-acoustic models of the heterogeneous seabed, taking into account the stratification, fluid and gas-saturated bottom sediments, the presence therein of cavities and the inclusion of various forms and properties. Algorithms have been developed for obtaining model acoustic response, which is the superposition of all acoustic signals reflected from geological boundaries, which have different reflectance coefficients. Acoustic reflection is described by the so-called convergent model. Mathematical modeling of bottom relief processes by means such as echo sounder, multi-beam echosounder and interferometer has been performed. With the aid of the developed software system, digital elevation models and isobathic maps of individual surveyed areas are created according to algorithms, which are described in this thesis work and using modern GIS systems.

Key words: spatial spectrum, bottom sediments, Fourier transformations, echo sounders, geoacoustic parameters of sediments, partition boundary, GIS technologies.