

ІНФОРМАЦІЙНА ГІДРОАКУСТИКА У ДОСЛІДЖЕННЯХ НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩ

The application of information hydroacoustics techniques in investigations of heterogeneous environments based on integrated approach to solving of wave problems are presented. The obtained results are related to the problem of modeling and synthesis of signals, recovery based on relevant features of characteristics of hydro heterogeneous formations.

Keywords: *information hydroacoustics, wave problems.*

Розглянуто застосування методів інформаційної гідроакустики у дослідженнях неоднорідних середовищ на основі комплексного підходу до вирішення хвильових задач. Одержані результати пов'язані з задачами моделювання та синтезу сигналів, відновлення за їх інформативними ознаками характеристик гідрофізичних неоднорідних утворень.

Ключові слова: *інформаційна гідроакустика, хвильові задачі.*

Широкомасштабні дослідження акустичних хвильових процесів у різноманітних середовищах і матеріалах одержують стрімке прискорення завдяки зростаючим потребам, пов'язаним з практичним використанням акустичних ефектів в інноваційних технологіях океанології, морській інженерії, матеріалознавстві, біомедицині, гідроакустиці.

Реалізація можливостей акустичних методів як перспективних, таких, що здатні забезпечити, окрім дистанційних спостережень, одержання достовірної інформації про явища та об'єкти, середовища та структури, потребує поглиблених фундаментальних та прикладних досліджень.

Багаторічні дослідження з інформаційної гідроакустики, що успішно розвиваються у Відділенні гідроакустики, одержали широке визнання як новий науковий напрямок [1].

Основна концепція наших досліджень – розвинення комплексного підходу шляхом об'єднання точних та наближених методів багатократного розсіяння, статистичної теорії конденсованих середовищ з методами і постулатами класичної хвильової теорії у розв'язанні загальної задачі

$$H_p(j\omega) = H_i(j\omega) \times H_c(j\omega), \quad (1)$$

де реєстрований сигнал $H_p(j\omega)$ є добутком передавальної характеристики середовища $H_c(j\omega)$ та характеристики посланого сигналу $H_i(j\omega)$.

Основоположна ідея теорії поширення та розсіяння хвиль, заснованої на фізичних законах теоретичної акустики, – переформулювання крайової задачі для стохастичного скалярного хвильового рівняння

$$\Delta U(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2a)$$

або рівняння Гельмгольца з випадковими коефіцієнтами

$$\Delta U(\vec{r}) + k^2 \varepsilon(\vec{r}) U(\vec{r}) = 0 \quad (2b)$$

в термінах інтегральних рівнянь і подання розв'язку у вигляді рядів теорії збурень

$$U(\vec{r}) = U_0(\vec{r}) - k^2 \int G(\vec{r}, \vec{r}') \tilde{\varepsilon}(\vec{r}') U_0(\vec{r}') d\vec{r}' + \\ + k^4 \iint G(\vec{r}, \vec{r}') G(\vec{r}', \vec{r}'') \tilde{\varepsilon}(\vec{r}') \tilde{\varepsilon}(\vec{r}'') U_0(\vec{r}'') d\vec{r}' d\vec{r}'' \dots \quad (2b)$$

Слід зазначити, що утримання в (2в) певної кількості доданків відповідає урахуванню міжчастинкових кореляцій та кратності розсіяння того ж порядку.

Виходячи з такої концепції, досліджують насамперед флуктуації акустичних полів залежно від розсіюючих властивостей середовища. Формулюються критерії аналізу статистичних характеристик скалярного поля у випадку різномасштабних просторово-часових кореляцій випадкових неоднорідностей. Розробляється методика урахування вищих порядків теорії збурень шляхом переходу до ефективних характеристик поля залежно від можливостей урахування корелятивних функцій різних порядків. Це передбачає формування правил виявлення критичних масштабів кореляцій неоднорідностей з метою переходу до певних наближень у визначенні статистичних та енергетичних ефективних польових характеристик.

Дослідження в галузі інформаційної гідроакустики, через специфіку досліджуваних об'єктів та складність середовищ поширення гідроакустичних сигналів, змушують залучати нові підходи до розв'язання задач. Зокрема, плідним виявився підхід, запропонований акад. Я. С. Підстригачем: рівняння (2) доповнюється ускладненою граничною умовою

$$L\left(\frac{\partial U}{\partial n}, q_1, q_2, q\right) - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

та початковою умовою

$$U = u_0, \dots \frac{\partial U}{\partial t} = U, \dots t = 0. \quad (4)$$

Тут L – диференціальний оператор по координатах на поверхні неоднорідності, у т.ч. з “плавними” межами, та по часу t ; q_1, q_2, q – компоненти вектора поверхневого навантаження на неоднорідності; n – нормаль до поверхні неоднорідності.

У такій крайовій задачі рівняння (3) відображає фізико-механічні характеристики неоднорідності та характер її впливу на гідроакустичне поле.

У нестационарних задачах інформаційної гідроакустики використовують методику В. Д. Кубенка, яка полягає у застосуванні апарату часового інтегрального перетворення Лапласа та подальшому зведенні його до розв'язання інтегральних рівнянь Вольтера 1-го та 2-го роду. Це полегшує розв'язання низки конкретних задач, зокрема, задач дифракції нестационарних сферичних хвиль на круговому циліндрі в рідині та всередині кругового циліндра, заповненого рідиною.

Проведені фундаментальні дослідження в галузі сингулярних інтегральних рівнянь дають змогу з достатньою точністю будувати математичні моделі для аналізу поведінки лінійних систем зі змінними параметрами та розв'язання широкого кола задач, пов'язаних з дистанційними дослідженнями об'єктів та обиранням оптимальних зондуючих сигналів, в океанології, медицині тощо.

У практичному плані – розв'язанні задач акустичного моніторингу морського середовища – дослідження гідрофізичної структури Чорного моря та особливостей променевого поширення звуку виявили високу щільність променевих траєкторій у задачах акустичного моніторингу, що визначається значними вертикальними градієнтами швидкості звуку (див. рис. 1).

Встановлено, що в умовах такої високої щільності променевих траєкторій акустичний моніторинг, заснований на променевому зондуванні та променевій реконструкції, дає змогу з високою точністю визначати розміри неоднорідностей та їх розміщення у просторі, відновлювати поля аномалії швидкості звуку.

Зазначимо, що задачі акустичного моніторингу зводяться до кореляційно-фазового аналізу, що дає можливість в умовах мілкого моря та приповерхневого звукового каналу (ПЗК) оцінювати динамічні характеристики середовища.

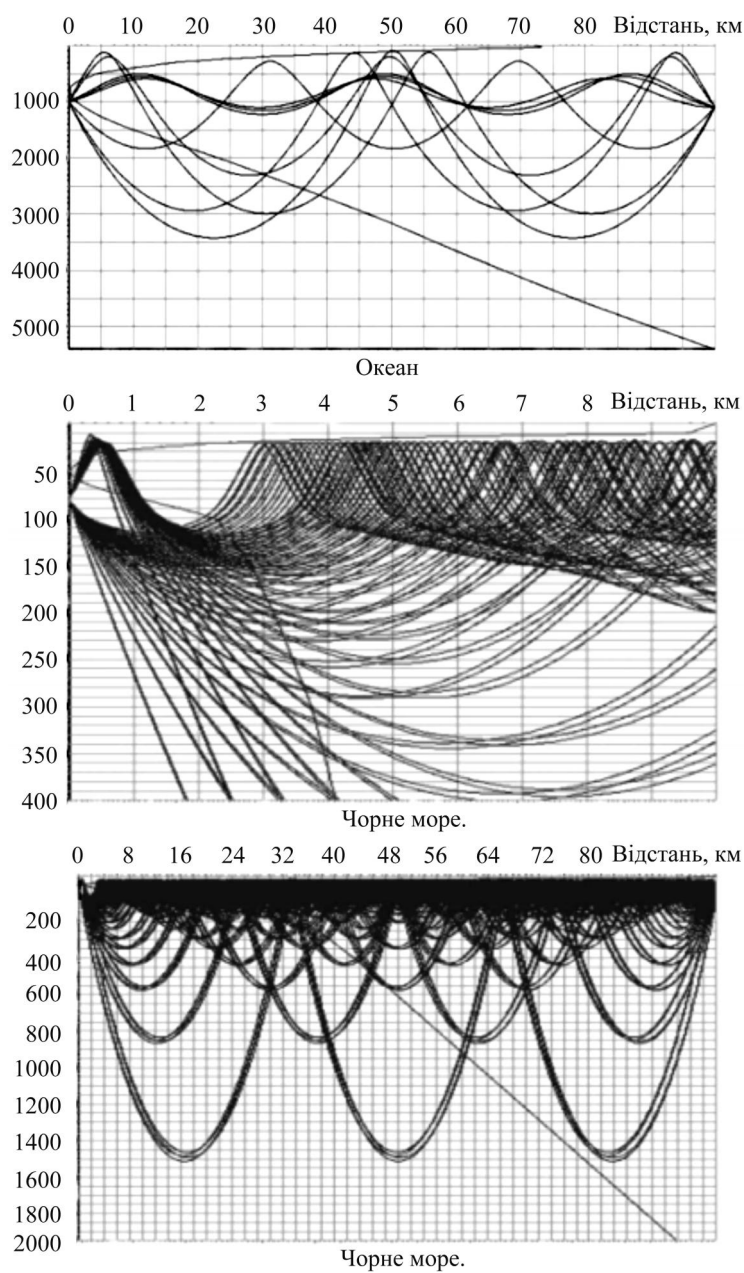


Рис. 1. “Акустична” відмінність Чорного моря та океану.

Для шельфової зони північно-західної частини Чорного моря розроблено та перевірено в натурних умовах концепцію гідроакустичних досліджень на квазі-стаціонарних трасах, створено акустичні моделі акваторії (гідролого-акустична, геоакустична та теоретична моделі описування звукового поля) і атлас втрат під час поширення звуку. Розроблені для характерних неоднорідностей Чорного моря акустичні моделі – антихвильовда аномалія, внутрішньотермоклинна лінза та антициклонічне вихрове утворення – зображені на рис. 2.

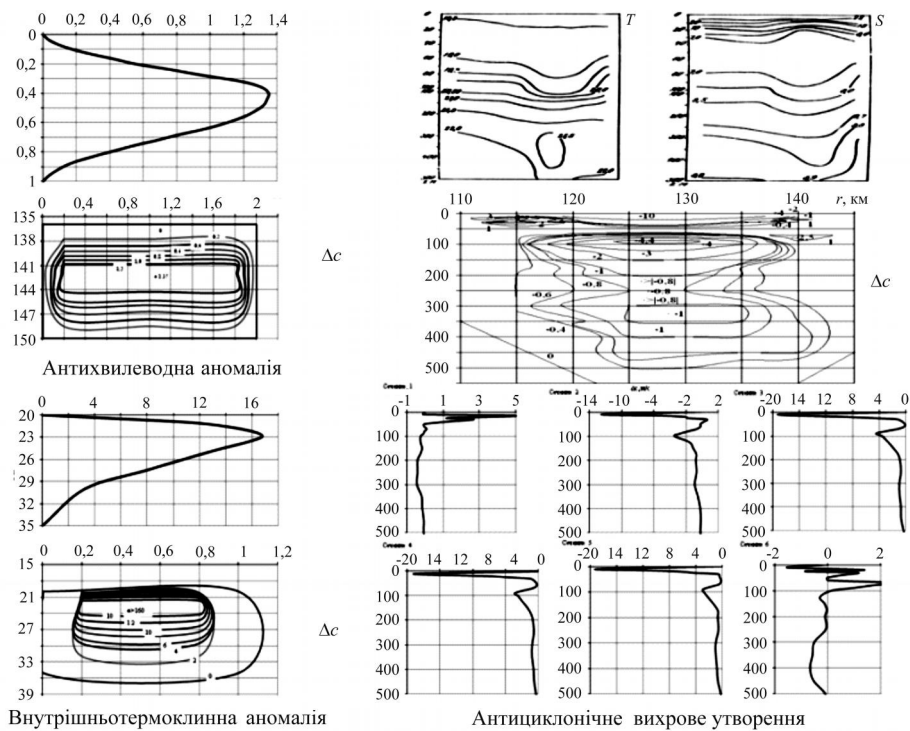


Рис. 2. Акустичні моделі характерних неоднорідностей Чорного моря.

Для різних умов Чорного моря (шельфової зони, материкового схилу) розроблено метод і проведено чисельне моделювання акустичного променевого зондування, що дає змогу реалізувати у вирішенні регіональних задач визначення та оцінювання дистанційними методами гідродинамічних особливостей, донних газовиділень тощо (рис. 3).

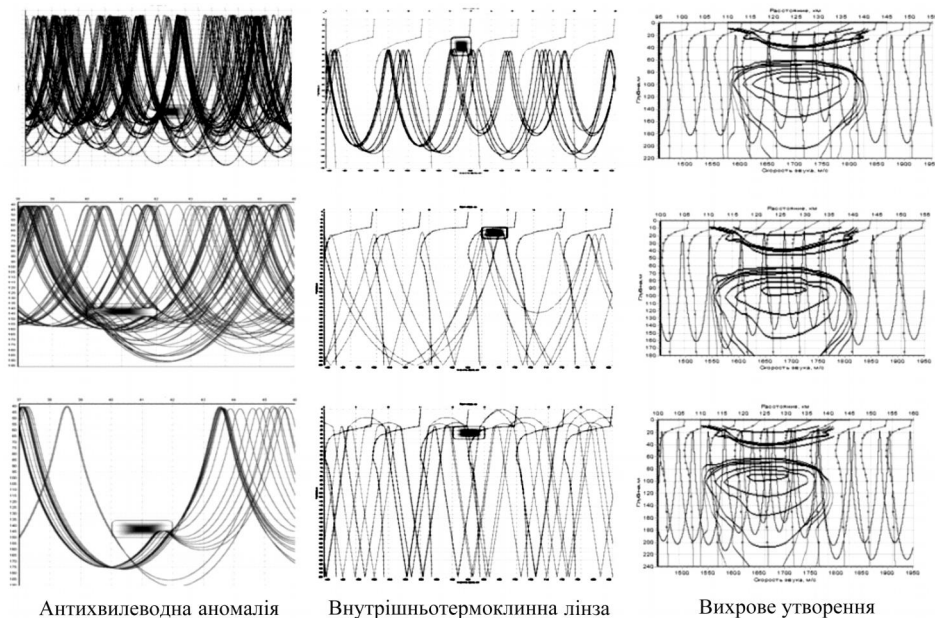


Рис. 3. Чисельне моделювання задач поширення в умовах неоднорідностей.

Результати впливу фактора “товщини” променя, пов’язаного з розсіянням звуку на дрібномасштабних неоднорідностях середовища, на часову та променеву структуру при поширенні, на похибки обчислення аномалії часу поширення по променю та впливу на них часу приходу сигналу і його тривалості зображені на рис. 4.

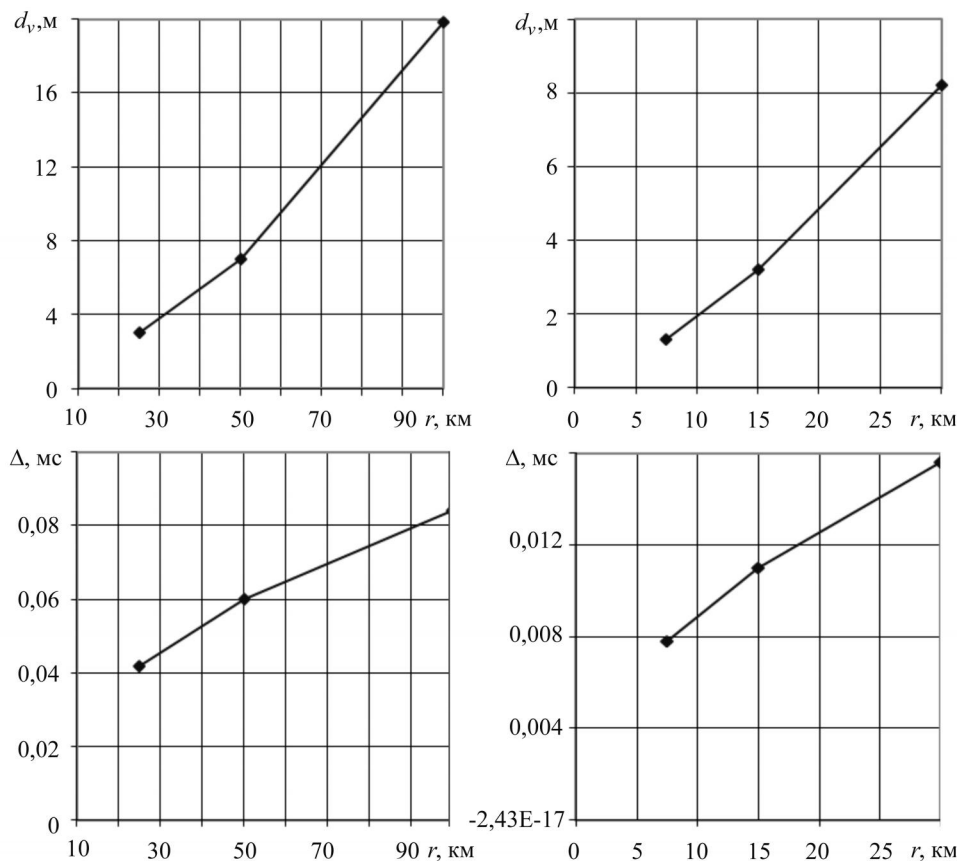


Рис. 4. Залежність “товщини” променя поблизу дна (а) і погіршення часового розділення (б) від відстані r в умовах ПЗК на різних глибинах ($H_m \geq 150$ м) і ($H_m = 100$ м) при різних характеристиках розсіюючих неоднорідностей.

Проведені дослідження показали, що в умовах розглянутих неоднорідностей для акустичного променевого зондування можна обрати променеві траєкторії, уздовж яких похибка обчислення аномалії часу поширення не перевищуватиме 10%, що дозволяє очікувати задовільну точність відновленого поля. Для перевірки ефективності запропонованого для відновлення аномалій поля методу акустичного зондування та променевої реконструкції по неаномальним променям, принципової можливості відновлення аномалії поля неоднорідності та оцінки точності такого відновлення проведено модельні розрахунки задачі відновлення аномалії поля антициклонічного вихрового утворення. Результати розрахунків, що зображені на рис. 5, підтвердили високу точність відновлення аномалії поля та високий ступінь подібності ізольованого вихідного і відновленого полів.

Результати експериментальних робіт на квазістаціонарних трасах і теоретичних робіт зі створення акустичної моделі району шельфа показали перспективність обраної концепції для досліджень інших районів Чорного моря, що становлять інтерес для розробки мінеральних ресурсів, експлуатації трубопроводів – в задачах телеметрії, телеуправління, акустичного моніторингу.

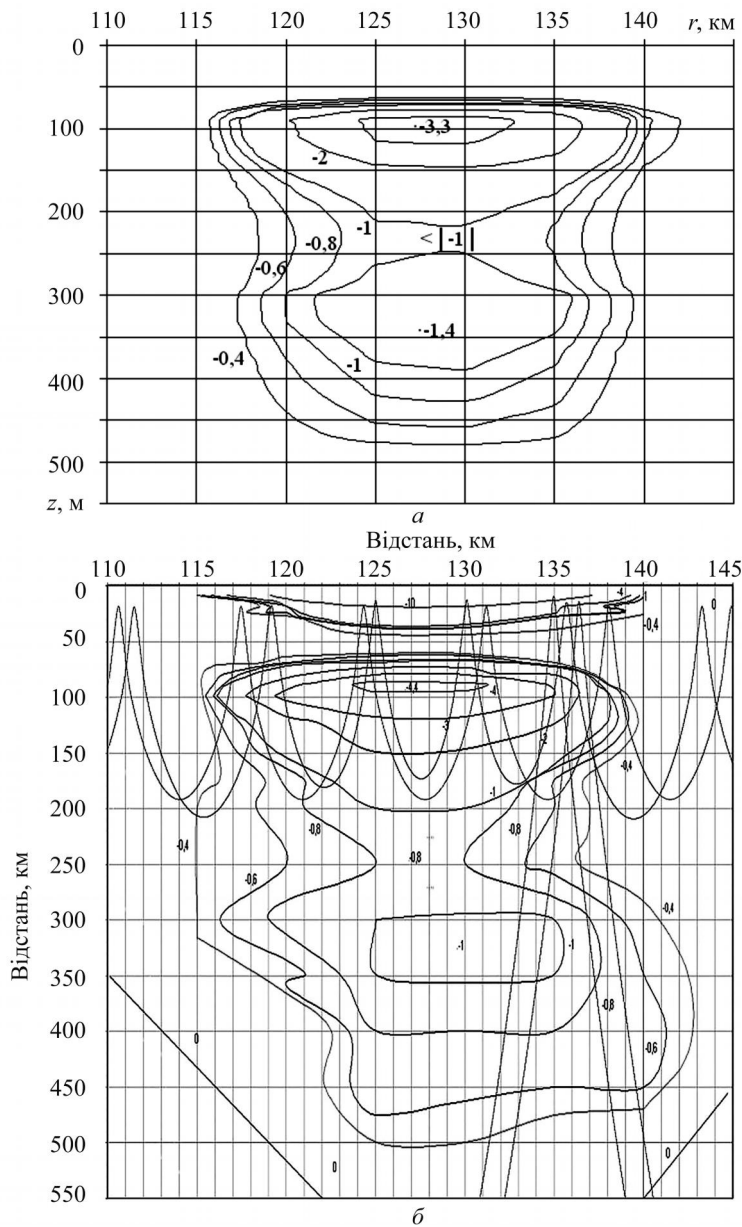


Рис. 5. Аномалія, що одержана за даними експерименту (а), та відновлена аномалія (б).

Квазістаціонарні траси (рис. 6) дають можливість контролювати характеристики хвилеводу, реалізувати фізичні моделі неоднорідностей, відпрацьовувати методики акустичного моніторингу середовища.

Акустична модель акваторії дає змогу моделювати умови освоєння родовищ, виявляючи “акустичне забруднення” акваторії. Атлас втрат при поширенні звуку дає можливість розв’язувати задачі телеметрії.

Враховуючи широке застосування акустичних методів у медицині, у Відділенні одержали розвиток наукові дослідження у цьому напрямі. Зокрема, як об’єкт акустичного прозвучування було досліджено шкіряний покрив людини, який є багат шаровим неоднорідним рідинним утворенням з великою в’язкістю, що характеризується сильною нелінійністю акустичних властивостей. Поширення звукових імпульсів у такому складному середовищі супроводжується їх сутте-

вою деформацією, зумовленою, з одного боку, наявністю дисперсії та неоднорідностей, а з іншого, – нелінійними ефектами. В зв'язку з цим у процесі поширення відбувається змінення форми імпульсу відповідно до законів деформації його комплексної обвідної, що викликане фазовими викривленнями (несталістю групової швидкості) у межах відповідної смуги частот. Останнє зумовлює викривлення енергетичного спектра імпульсу уздовж шляху його поширення: він, по-перше, відчуває послаблення, і, по-друге, зміну форми, яка визначається функцією

$$S(\omega, z) = |A(\omega)|^2 e^{-2\text{Im}k(\omega) - k(\omega_0)]z} \quad (5)$$

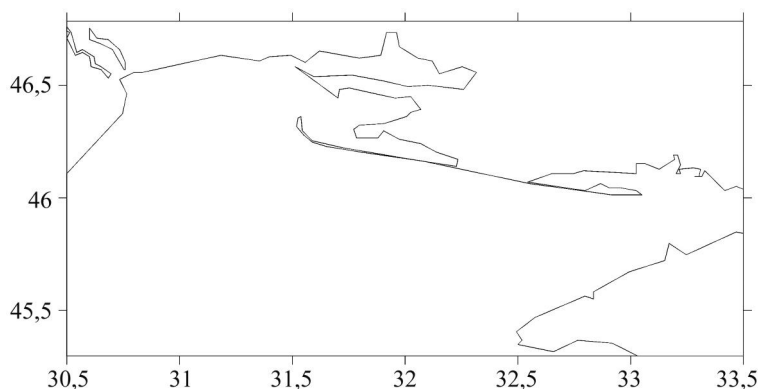


Рис. 6. Розміщення квазістаціонарних гідроакустичних трас на полігоні ПЗЧМ.

Експериментальні результати прозвучування тришарових утворень різних за складом та густиною високочастотним імпульсним випромінюванням, коли довжини хвиль співмірні з неоднорідними утвореннями та товщинами шарів, наведено на рис. 7 у вигляді осцилограм амплітудно-фазових характеристик сигналу. Наявне згасання сигналу та його фазові зміни залежно від густини матеріалу та товщини шарів, що досить задовільно описується виразом (5).

Проведені теоретичні дослідження виявили, що при прозвучуванні шарувато-неоднорідного шкіряного покрову високочастотним імпульсним випромінюванням відбувається змінення форми імпульсу та розширення його спектра (див. рис. 7).

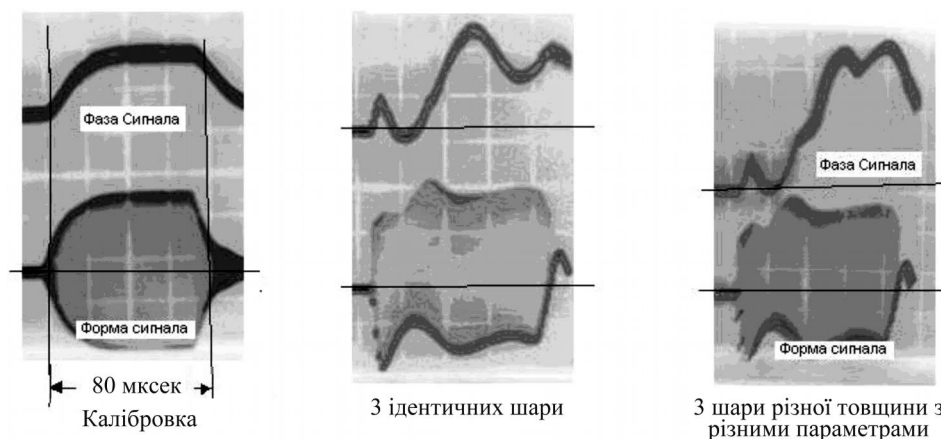


Рис. 7. Осцилограми амплітудно-фазових характеристик сигналу.

Обрання способу введення лікарських препаратів в організм являє собою надзвичайно важливий момент, що визначає швидкість, силу та тривалість фармакологічного ефекту. В лікувальній практиці один з ефективних способів потрапляння лікарських препаратів до організму – трансдермальне введення.

Проведений у Відділенні гідроакустики комплекс науково-експериментальних робіт виявив, що у зв'язку з тим, що шкіряний покрив, який являє собою складну захисну систему, при традиційно використовуваних засобах посилення проникності лікувальних складових (застосування хімічних реагентів) може відповісти шляхом ввімкнення власних захисних патофізіологічних процесів, включаючи запальні та імунні реакції. Застосування ультразвуку з цією метою не викликає довгострокову втрату бар'єрних властивостей шкіри при одночасному підсиленні проникнення лікувальних складових, зокрема таких, що містяться в Куяльницькій лікувальній грязі [2]. Доцільними виявились дослідження можливостей застосування акустичних коливань при консервації лікувальної Куяльницької грязі (рапи) та подальшого їх використання під час грязелікування: сумісної дії ультразвуку і грязі на непошкоджену шкіру для підсилення трансдермального проникнення лікувальних складових грязі.

Один з напрямів досліджень Відділення гідроакустики, у якому одержано оригінальні результати, – вивчення мінливості рівня Чорного моря та порівняння її з іншими регіонами та кліматичними характеристиками. Одержано дані про коливання рівня Чорного моря та суші по низці станцій західного узбережжя, завдяки чому створено підстави для геологічних досліджень цього регіону, визначені зміни максимального рівня та внесок до них природних та антропогенних факторів, уточнено проведення інженерних робіт у прибережній смузі та показано можливість застосування дистанційних засобів у методах моніторингу коливань рівня моря. Також встановлено тенденції та характеристики кліматичних змін рівня на західному узбережжі Чорного моря та Світового океану, показано квазі-синхронність за роками їх максимальних значень між собою та з явищем Ель-Ніньо.

Отже, розроблені теоретичні методи, статистичні схеми та моделі виявляють нові ефекти та закономірності, поглиблюють та деталізують знання про поширення та дифракцію звуку в неоднорідних середовищах.

Зазначимо, що рівень теоретичних знань про акустичні хвильові процеси у неоднорідних середовищах, досвід технічної реалізації гідроакустичних систем сформувавши базис, що дає змогу, окрім традиційних науково-дослідних та прикладних задач, розвивати та поглиблювати дослідження процесів взаємодії акустичних полів із складними конденсованими середовищами, зокрема, біологічними. Формування, поширення та розсіяння звуку у таких середовищах, які характеризуються власною структурною організацією, вираженими нелінійними, термодинамічними, дисперсійними та іншими властивостями, – один з пріоритетних напрямів сучасної акустичної науки, перелік задач якого досить широкий.

Такі науково-дослідні роботи дають змогу не лише вийти на якісно новий рівень у розумінні фізичної природи взаємодії акустичного випромінювання з складними середовищами та речовинами, а й здійснити наступний крок в області практичного їх використання, наприклад, в оптимізації засобів активної локації широкого призначення для океанології, біомедицини тощо як результату сформованої нової інформаційної якості гідроакустичних засобів, в області акустичних технологій – в удосконаленні механізмів технологічних діянь.

1. Кузьміна Л. М., Скіпа М. І. Хвилі і середовище. Припущення та наближення. – К.: Наук. думка, 2008. – 140 с.
2. Патент України № 95862. Основа для виробництва косметичних та лікувальних грязевих препаратів / І. А. Кравченко, М. І. Скіпа, О. В. Альтер, С. Д. Саленко. – Опубл. 12.09.2011 р.