

УДК 551.463.21

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.07

АЛГОРИТМ АКУСТИЧНОЇ ТОМОГРАФІЇ З ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ІЗОТРОПНОСТІ ГІДРОАКУСТИЧНОГО ПОЛЯ

А. Б. КАПОЧКІНА¹, М. Б. КАПОЧКІНА^{2*}

¹Мале Приватне Підприємство «Трансконтинентальне сейсмопрогнозове бюро», м. Одеса, УКРАЇНА

²Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту військово-морських сил Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, УКРАЇНА

*e-mail: margo-92@ukr.net

АНОТАЦІЯ Однією з первинних характеристик морського середовища є швидкість звуку, яка дуже чутливо відображає найменші його зміни. Причому, ця характеристика є інтегральною, цілісною. Вона нероздільно характеризує стан системи, який формується цілим комплексом впливів та реакцій на них. Розділяючи впливи та реакції на відомі на даному етапі розвитку фізики, так звані, температуру, солоність, тиск, ми нібито спрощуємо систему та її розуміння, а насправді залутуємося, надаючи якомусь із факторів дуже великого, чи дуже малого значення (можливостей впливу на систему). Акустична томографія базується, у тому числі, на опромінюванні звуком морського середовища та аналізі прийнятого сигналу на предмет оцінки змін його характеристик після проходження через водний простір. Зміни характеристик акустичного сигналу можуть відбуватися з річних причин, однією з яких є просторові зміни вертикального розподілу швидкості звуку. В результаті теоретичних досліджень у напрямку пасивної акустичної томографії, методами моделювання рефракції акустичних хвиль, вперше визначено новий тип кількісних характеристики акустичного поля. Запропоновано принцип визначення відповідної опорної характеристики акустичного поля, на підставі чого розроблене підґрунтя для створення алгоритмів відновлення вертикального розподілу швидкості звуку. Алгоритм визначення опорної характеристики, у тому числі, включає розрахунок втрат акустичної енергії, який переводиться у частотну область для визначення позитивного екстремуму амплітудного спектру і розрахунку опорної характеристики регіонального акустичного поля у часовій області. Адаптовано один з низки алгоритмів визначення просторової ізоотропності вертикального розподілу швидкості звуку. Впровадження зазначеного алгоритму пасивної акустичної томографії забезпечить корабельні гідрокачатори вхідними даними для визначення глибини, що підвищить безпеку мореплавства.

Ключові слова: гідроакустика; акустична томографія; рефракція; просторовий спектральний аналіз; зона акустичної тіні; функція когерентності; вертикальний розподіл швидкості звуку

ACOUSTIC TOMOGRAPHY ALGORITHM FOR DETERMINING THE SPATIAL ISOTROPICITY OF THE HYDROACOUSTIC FIELD

В. КАРОЧКІНА¹, М. КАРОЧКІНА²

¹Firm «Transcontinental Seismological Bureau», Odesa, UKRAINE

²Scientific-research center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of Military and Naval Forces of the National University of Odesa Maritime Academy, Odesa, UKRAINE

ABSTRACT One of the primary characteristics of the marine environment is the speed of sound, which very sensitively reflects its smallest changes. Moreover, this characteristic is integral, integral. It inseparably characterizes the state of the system, which is formed by a whole complex of influences and reactions to them. By separating the effects and reactions on the so-called temperature, salinity, pressure, known to us at this stage of the development of the physics, we supposedly simplify the system and its understanding, but in fact we get confused, giving one of the factors very great or very little importance (the possibilities of influence on system). Acoustic tomography is based, among other things, on the sound irradiation of the marine environment and the analysis of the received signal for the purpose of evaluating changes in its characteristics after passing through the water space. Changes in the characteristics of the acoustic signal can occur for annual reasons, one of which is spatial changes in the vertical distribution of sound speed. As a result of theoretical research in the direction of passive acoustic tomography, using the methods of modeling the refraction of acoustic waves, a new type of quantitative characteristics of the acoustic field was determined for the first time. The principle of determining the appropriate reference characteristic of the acoustic field is proposed, on the basis of which the basis for creating algorithms for restoring the vertical distribution of sound speed is developed. The algorithm for determining the reference characteristic, including, includes the calculation of acoustic energy losses, which is translated into the frequency domain to determine the positive extremum of the amplitude spectrum and the calculation of the reference characteristic of the regional acoustic field in the time domain. One of a number of algorithms for determining the spatial isotropy of the vertical sound speed distribution has been adapted. The implementation of the specified algorithm of passive acoustic tomography will provide ship sonar with input data for depth determination, which will increase the safety of navigation.

Keywords: hydroacoustic; acoustic tomography; refraction; spatial spectral analysis; acoustic shadow zone; coherence function; vertical distribution of sound speed.

Вступ

Актуальність теми дослідження обґрунтовується тим, що висвітлення підводної

обстановки на відстанях, що вимірюються в десятках метрів і більше можливе лише гідроакустичними методами та засобами. Судна і кораблі мають штатне гідроакустичне обладнання. Загальновідомо, що

одним з аргументів визначення дистанції гідролокаційним методом, як і розрахунку похибки пеленгу методом шумопеленгації, є швидкість звуку. Точність сучасних гідролокаторів, що діють за інтерферометричним і фазовим принципами визначення дистанції (сонар з синтезованою апертурою – SAS) також залежить від ступеню анізотропії поля швидкості звуку.

Необхідно зазначити, що на сучасному науково-технічному рівні забезпечення інформацією про просторово-часовий розподіл швидкості звуку, зазвичай обмежуються поодинокими дискретними у часі та просторі вимірюваннями вертикального розподілу швидкості звуку перед початком гідролокаційних робіт, і як правило, лише з метою визначення оптимальної глибини занурення випромінювача гідролокатора [1–10].

Таким чином можна констатувати, що є підстави вважати актуальним вирішення проблеми кількісної оцінки просторової анізотропності поля швидкості звуку в океанах та морях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Акустична томографія базується, у тому числі, на опромінуванні звуком морського середовища та аналізі прийнятого сигналу на предмет оцінки змін його характеристик після проходження через водний простір. Зміни характеристик акустичного сигналу можуть відбуватися з різних причин, однією з яких є просторові зміни вертикального розподілу швидкості звуку. Отримання просторової інформації про вертикальний розподіл швидкості звуку є одним з найважливіших завдань, чисельним визначенням яких займається акустична томографія.

У роботах [11,12] наводяться результати чисельних експериментів для виявлення гідрологічних неоднорідностей у заданих шарах водного середовища. У дослідженні [13] вирішується задача прогнозування сейсмічних небезпек у морському середовищі. У роботі [14] досліджується проблема визначення течій. Визначення вертикального профілю швидкості звуку методом пасивної акустичної томографії досліджується у матеріалах статті [15]. Профіль швидкості звуку визначається за даними розрахунку кореляції шумів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про вкрай вузьке коло фахівців, які займаються визначенням вертикального розподілу швидкості звуку методом акустичної томографії. Більшість результатів досліджень поки що не мають кінцевого результату, і тому не можуть бути використані на практиці для забезпечення гідроакустичного обладнання кораблів вхідними даними про вертикальний розподіл швидкості звуку, що унеможливило використання розрахункових алгоритмів для визначення відстані до навігаційної небезпеки.

Постановка задачі та її розв'язання

Аналізуючи результати акустичних експериментів Одеського відділення гідроакустики МГІ НАНУ [16,17], автори статті вперше визначили, що однією з базових характеристик морського середовища є періодичність прояву у водному просторі зон акустичної тіні, які виникають завдяки рефракції звуку.

Завдяки цій базовій акустичній характеристиці водного середовища вперше виникли підстави для досліджень її просторової мінливості, ступеню анізотропності, просторового розподілу вертикального розподілу швидкості звуку.

Кожний вертикальний розподіл швидкості звуку формує власну акустичну картину траєкторій розповсюдження акустичних променів. Шляхом кількісної оцінки і порівняння обраної характеристики акустичної картини траєкторій розповсюдження акустичних променів з фоновою, «опорною» характеристикою, очікується отримання інформації про ізотропність вертикального розподілу швидкості звуку.

Пропонуються результати теоретичних досліджень, на підставі яких створено алгоритм регіональної моделі акустичної томографії. Виконана верифікація зазначеного алгоритму шляхом порівняння результатів, отриманих теоретичним шляхом, з результатами виконаного експерименту.

Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття

Дослідження характеристик просторового розповсюдження звуку у воді виконуються за хвильовою та променевою методиками. Результати акустичних експериментів Одеського відділення гідроакустики МГІ НАНУ [16,17] були оброблені за хвильовою методикою. Було використано променеву методику обробки даних, бо її результати більш наочні. За таких обставин виникає необхідність спростування сумнівів, чи підтвердиться періодичність просторового прояву акустичних тіней розрахунками за променевою методикою.

У табл. 1 наведено результати порівняння розрахованих періодичностей формування зон акустичних тіней за хвильовим та променевим методом.

Аналіз даних, наведених у табл. 1, показує добре співпадіння результатів розрахунків за променевою та хвильовою моделями.

Наведені результати свідчать про об'єктивність періодичних проявів зон акустичної тіні (ЗАТ), як базової характеристики морського середовища, і є підставою для розробки за цією характеристикою алгоритму визначення просторової ізотропності вертикального розподілу швидкості звуку в рамках регіональної моделі акустичної томографії.

Таблиця 1 – Результати порівняння періодів формування зон акустичної тіні за променевим і хвильовим методами розрахунку рефракції.

Глибина приймача	Період амплітудного спектру (хвильовий метод розрахунку)	Період амплітудного спектру (променевий метод розрахунку)	Період взаємного амплітудного спектру	Когерентність
4,85 м	201 м	214 м	208 м	0,77
7,75 м	217 м	204 м	208 м	0,63
9,2 м	250 м	214 м	227 м	0,35
12,1 м	204 м	211 м	208 м	0,86

Результати розрахунків, виконаних за променевою моделлю, показані на рис 1. Розрахунками охоплено трикілометрову зону навкруги випромінювача гідролокатора, що встановлений на глибині 6 м.

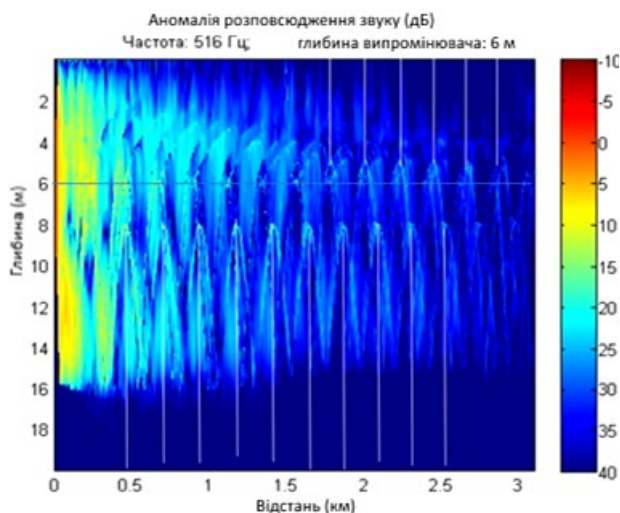


Рис. 1 – Результати розрахунку просторового розподілу розповсюдження акустичних променів

Вище та нижче випромінювача гідролокатора зони акустичної тіні формуються періодично, кожні 270–280 м. Особливістю є те, що вище і нижче випромінювача циклічні повторення у просторі зон акустичної тіні мають певний фазовий зсув, але частотні характеристики є незмінними. Тобто, ширина ЗАТ не залежить від глибини.

Виклад основного матеріалу дослідження

У якості оцінюваного параметру в методі акустичної томографії для визначення просторових змін вертикального розподілу швидкості звуку було обрано чисельну характеристику просторових змін траекторій розповсюдження акустичних променів. Підставою для такого рішення стало виявлення

природного феномену – циклічної зміни навкруги джерела звуку зон високої та низької щільності акустичних променів. Променева теорія акустичної томографії базується на наближенні, що фонове акустичне середовище завжди відоме. Виходячи з цього, базовим акустичним полем обрано кліматичну характеристику вертикального розподілу швидкості звуку у квадраті Марсдена № 17859, у межах якого проходив акустичний експеримент. За променевою методикою розраховано просторовий розподіл траекторій розповсюдження акустичних променів і отримано чисельну оцінку змін у просторі ширини ЗАТ. Зазначена чисельна оцінка опорного акустичного поля обрахована методами швидкого перетворення Фур'є: із часової переведена у частотну область. На рис. 2 показано амплітудний спектр змін у просторі ширини ЗАТ за опорним акустичним полем.

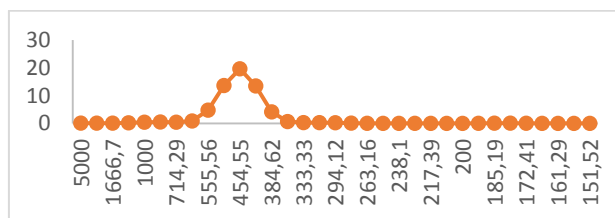


Рис. 2 – Амплітудний спектр змін у просторі ширини ЗАТ за опорним акустичним полем

Чисельна оцінка опорного акустичного поля у методі акустичної томографії, що відповідає кліматичному вертикальному розподілу швидкості звуку, на рис. 3 показана у часовій області у вигляді гармоніки з періодом 454 м.

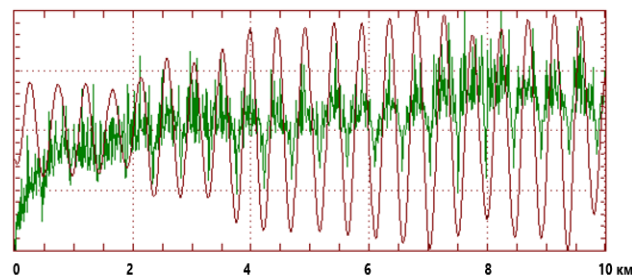


Рис. 3 – Результати розрахунку: чисельної оцінки опорного акустичного поля у часовій області (червоний колір); просторових втрат акустичної енергії на фіксованій глибині (зелений колір) в умовних одиницях

Результати отримані методом вузько-смужової фільтрації ряду просторових втрат акустичної енергії (смуга 384–550 м). Алгоритм визначення опорної характеристики включає:

- обрання кліматичної характеристики вертикального розподілу швидкості звуку у

відповідному квадрату Марседена у відповідний місяць року;

- розрахунок за променевою методикою траєкторій розповсюдження акустичних хвиль;
- за відповідним розрахунком за променевою визначається просторовий чисельний ряд втрат акустичної енергії;
- просторовий ряд втрат акустичної енергії шляхом швидкого перетворення Фур'є переводиться у частотну область і визначається позитивний екстремум амплітудного спектру просторового чисельного ряду втрат акустичної енергії;
- за визначеним чисельним значенням позитивного екстремуму амплітудного спектру, шляхом застосування до просторового чисельного ряду втрат акустичної енергії процедури вузько-смужової фільтрації, розраховується опорна характеристика регіонального акустичного поля у часовій області;
- отриманий часовий ряд, шляхом швидкого перетворення Фур'є, переводиться у частотну область;
- отримуємо амплітудний спектр – опорну характеристику регіонального акустичного поля.

Акустичний експеримент, у ході якого була виконана верифікація алгоритму визначення вертикального розподілу швидкості звуку методом акустичної томографії, був виконаний у відповідному квадрату Марседена у районі мілкого моря з плоским дном за сприятливих погодних умов. Під час експерименту вздовж прямої лінії з дискретністю 4 км було встановлено чотири буї з однотипними гідрофонами, що були розміщені на однаковій глибині. Випромінювач акустичного сигналу з частотою 80 Гц рухався з постійною швидкістю уздовж прямої від першого до четвертого буя. Таким чином, чотири гідрофони надали записи змін у часі амплітуди акустичного сигналу, яка методом швидкого перетворення Фур'є переведена у частотну область (рис. 4).

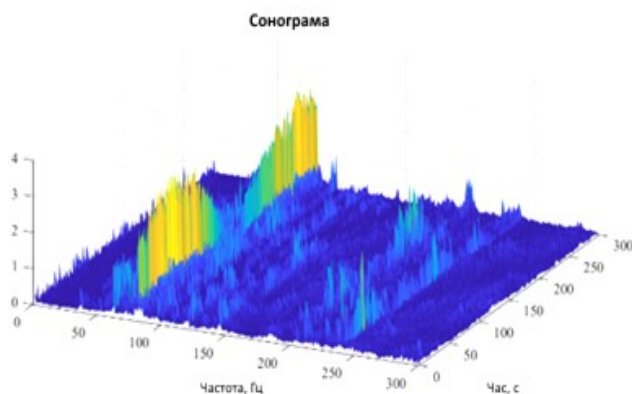


Рис. 4 – Зміни у часі амплітудного спектру сонограми шумів, зафіксованих одним з гідрофонів

На рис. 4 показано результат фіксації змін (у міру віддалення джерела шуму від приймача) амплітудного спектру шумів, у складі яких штучно випромінюваний акустичний сигнал з частотою 80 Гц.

Тобто, експеримент виконано методом пасивної томографії, коли водне середовище опромінюється шумами від штучного джерела (джерел), поточні координати і акустична сигнатура яких фіксується мережею гідрофонів безперервно у часі та просторі.

Експериментом була охоплена акустична траса довжиною 12 км. Шляхом обробки записів змін у часі амплітуд акустичного сигналу і координат джерела випромінювача, на глибині гідрофону отримано час фіксації акустичної тіні, а за координатами джерела звуку – відстань зони акустичної тіні від джерела звуку і, відповідно, її координати на акустичній трасі.

На рис. 5 наведено графік фактичних змін у просторі відстаней між ЗАТ навкруги джерела звуку, що пересувається по траєкторії, яка фіксується радіоелектронними засобами, наприклад AIS. За наявності донної мережі гідрофонів кожне місце підводного простору оцінюється за результатами записів шумів. За розробленим алгоритмом відповідно до аналізу сигнатури шумів від штучного джерела, розраховується амплітудний спектр сигналу, зафіксованого гідрофоном, який є фактичною характеристикою регіонального акустичного поля. Отримана чисельна характеристика порівнюється з опорною характеристикою. У випадку їх неспівпадання, робиться висновок про анізотропність акустичного поля, його координати і просторові розміри.

У результаті обробки за зазначеною технологією записів чотирьох буїв був отриманий просторовий ряд змін у просторі ширини ЗАТ (рис. 5).



Рис. 5 – Графік змін у просторі відстаней між ЗАТ

Розрахунками вздовж усієї довжини траси (12 км) встановлено, що спектральний діапазон експериментально визначеної (фактичної) ширини ЗАТ становить 312–625 м і він ширший від опорного (384–550 м). За рахунок того, що оцінка середнього значення експериментального просторового ряду ЗАТ не співпадає з його медіаною, екстремум фактичного спектру є зміщеним і становить 416 м (екстремум опорного спектру – 454 м).

Для порівняння отриманих даних з опорною характеристикою регіонального акустичного поля необхідне їх переведення у частотну область, тобто перевести просторовий ряд з довжин у цикли. Алгоритм порівняння фактичної оцінки з опорною включав покроковий розрахунок спектру фактичного

ряду і кроспектру для опорного та фактичного спектрів. Розрахунки виконувалися з просторовим вікном, шириною 1 км, яке повинно гарантовано охопити два цикли гармоніки ЗАТ. Опрацювання просторового ряду ЗАТ акустичної траси виконано з кроком 0,1 км. В результаті, на акустичній трасі (від відмітки 0,3 км до відмітки 12 км) від приймача до джерела сигналу отримано 108 оцінок спектрів фактичного ряду і кроспектрів фактичної і опорної величин. До подальших обчислень було взято чисельне значення позитивного екстремуму кроспектру фактичного та опорного сигналів і оцінка когерентності на частоті цієї оцінки.

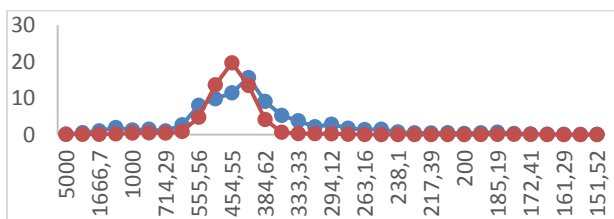


Рис. 6 – Амплітудні спектри: фактичного ряду просторових змін значень втрат акустичної енергії на частоті 80 Гц, оцінений вздовж акустичної траси довжиною 12 км (синій); «опорного» ряду регіонального кліматичного акустичного поля (червоний)

Аналіз кроспектру полягав у визначенні його позитивного екстремуму та оцифруванні отриманої ширини ЗАТ у циклах розрахунку кроспектру. Таким чином, у просторовому діапазоні 0,3–12 км було проведено розрахунок крос-спектральних характеристик фонових (опорних) просторових змін ширини ЗАТ, які характерні для опорного вертикального розподілу швидкості звуку у воді, та спектральних характеристик ширини ЗАТ, отриманих експериментально, що є функцією фактичного вертикального розподілу швидкості звуку.

Для отримання статистично коректних порівняльних оцінок фактичного ряду змін у просторі ширини ЗАТ за розрахунком спектру було виконано процедуру вилучення лінійного тренду. Результати перетворення просторового ряду довжин ЗАТ (рис.5) у просторовий ряд циклів ЗАТ показано на рис. 7.

Розраховані статистичні характеристики змін у просторі фактичної оцінки акустичного поля методом акустичної томографії надані у табл. 2.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики зміни у просторі ширини ЗАТ відносно циклу з періодом 454 м.

Середнє значення (м)	Медіана (м)	СКВ (м)
0	-12	75

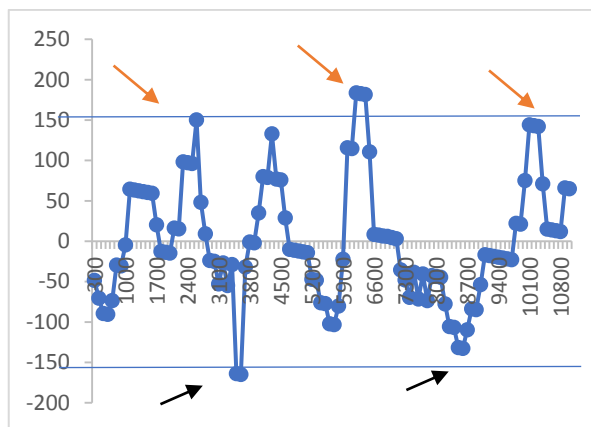


Рис. 7 – Графік змін у просторі фактичної оцінки ширини ЗАТ у циклах (нульова відмітка на шкалі ординат відповідає циклу з періодом 454 м). Стрілками показано статистично значимі аномалії.

На графіку (рис. 7) горизонтальними лініями виділено і показано просторове положення на акустичній трасі центрів ділянок водного простору, в межах яких ЗАТ формуються в умовах вертикального розподілу швидкості звуку, що відрізняється від базового на $+2\sigma$ (три ділянки) і на -2σ : (дві ділянки). Просторове положення зазначених ділянок показано стрілками. Ширина зазначених ділянок вимірюється сотнями метрів. Тобто графік, показаний на рис. 7, у першому наближенні дозволяє визначити місця на акустичній трасі з ізотропним та анізотропним розподілом вертикального розподілу швидкості звуку і дозволяє визначити знак анізотропії.

Автори розуміють, що сканування вхідного ряду вікном певної ширини і з певним кроком пов'язане з негативним ефектом розмиття фактичного положення зон максимальних відхилень практично оцінених ЗАТ. Тому було запропоновано мінімізувати це через залучення до аналізу спектрів фактичного ряду: просторового ряду амплітуди позитивного екстремуму кроспектру і просторового ряду когерентності кроспектру на частоті позитивного екстремуму його амплітуди.

Залучення до аналізу просторового ряду амплітуд позитивного екстремуму кроспектру використано для визначення ділянок з ізотропним розподілом швидкості звуку, що збігається з опорними характеристиками акустичного поля. Передбачається, що збільшення амплітуди кроспектру свідчить про вагомий вплив не тільки опорної, але й фактичної гармонік, тобто про те, що гармоніка з періодом опорної явно виражена. Таким чином, за ознаку ізотропії приймається позитивний екстремум.

Залучення до аналізу просторового ряду когерентності на частоті екстремуму амплітудного кроспектру просторового ряду використано для визначення ділянок з анізотропним розподілом швидкості звуку. Тобто, таким чином визначаються

ділянки на акустичній трасі, в межах яких, періоди циклів ЗАТ для опорного та фактичного варіантів є різними. Таким чином, за ознаку аномальної анізотропії приймається негативний екстремум.

Спочатку вирішимо задачу визначення ділянок акустичної траси з ізотропним у просторі вертикальним розподілом швидкості звуку. На рис.8 наведено графіки просторових змін фактичної ширини ЗАТ та просторових змін ряду амплітуд кроспектру, отриманих в результаті експерименту та базових довжин ЗАТ.

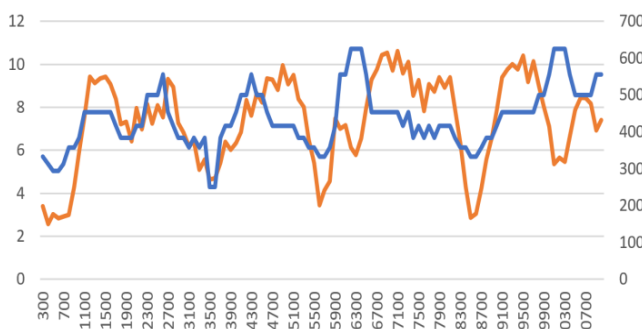


Рис. 8 – Графіки просторових змін фактичної ширини ЗАТ (синій колір) та просторових змін ряду амплітуд кроспектру виміряних та базових довжин ЗАТ (жовтий колір)

Якщо амплітуда екстремуму кроспектру співпадає з екстремумом просторових змін фактичної ширини ЗАТ, є підстава вважати, що просторове положення екстремуму спектру не є зсунутим у просторі. На графіку показано, що ділянки на акустичній трасі: 1100–1600 м; 4700–5200 м; 6700–7300; 9100–9700, де ширина фактичної ЗАТ співпадає з опорною шириною ЗАТ. На зазначених визначених ділянках вертикальний розподіл швидкості звуку є незмінним у просторі, тому акустичне поле слід вважати ізотропним і таким, що відповідає фоновому (опорному).

Таким чином, нами вперше розроблено алгоритм визначення районів, що характеризуються ізотропним акустичним полем.

Тепер вирішимо задачу визначення ділянок акустичної траси з анізотропним у просторі вертикальним розподілом швидкості звуку.

Визначення районів з анізотропним розподілом акустичних характеристик є найактуальнішою задачею для дослідження акваторій з обмеженими можливостями застосування інтерферометричного методу виміру дистанції (глибини). Ідентифікація районів з анізотропним розподілом акустичних характеристик пропонується за ознакою негативних екстремумів просторових змін ряду когерентності на частоті позитивного екстремуму кроспектру виміряних та розрахованих довжин ЗАТ.

На нашу думку цей критерій більш об'єктивно фіксує місця різких просторових змін вертикального розподілу швидкості звуку (рис. 9).

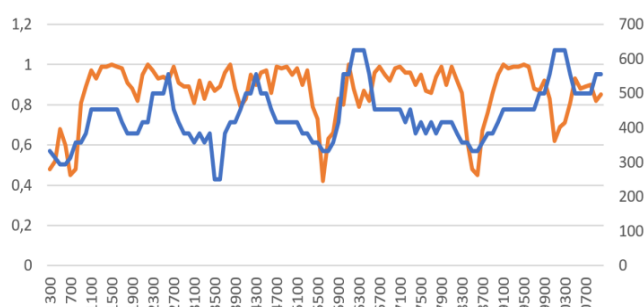


Рис. 9 – Графіки просторових змін фактичної ширини ЗАТ (синій колір) та просторових змін ряду когерентності кроспектру виміряних та розрахованих довжин ЗАТ (жовтий колір)

У якості критичного рівня обрано значення когерентності нижче за значення 0,75. Такі екстремуми когерентності сформовані на чотирьох ділянках акустичної траси (табл. 3).

Таблиця 3 – Ділянки акустичної траси з анізотропним полем вертикального розподілу швидкості звуку.

Відстань від початку акустичної траси (м)	Значення когерентності кроспектру	Значення циклу ЗАТ
Зона анізотропного вертикального розподілу швидкості звуку (300-800 м)		
300	0,48	333
400	0,52	312
500	0,68	294
600	0,60	294
700	0,45	312
800	0,48	357
зона анізотропного вертикального розподілу швидкості звуку (5500-5800 м)		
5500	0,73	357
5600	0,42	333
5700	0,63	333
5800	0,66	357
Зона анізотропного вертикального розподілу швидкості звуку (8400-8800 м)		
8400	0,62	357
8500	0,48	333
8600	0,45	333
8700	0,67	357
зона анізотропного вертикального розподілу швидкості звуку(10100-10300)		
10100	0,62	625
10200	0,69	625
10300	0,71	625

На рис. 10 показано графік змін у просторі фактичної оцінки ширини ЗАТ, відкоригований з застосуванням алгоритму визначення анізотропних ділянок акустичної траси.

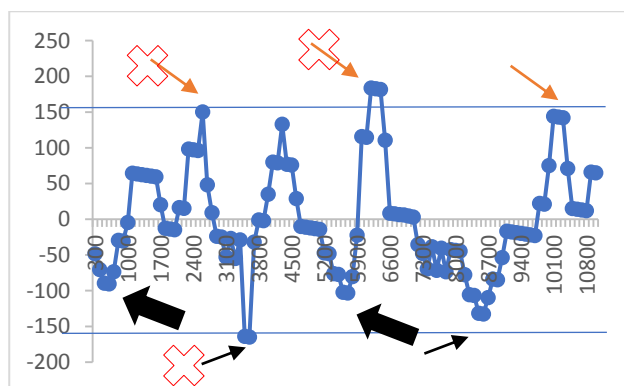


Рис. 10 – Графік змін у просторі фактичної оцінки ширини ЗАТ у циклах (нульова відмітка на шкалі ординат відповідає циклу з періодом 436 м)

На графіку показано, що три з п'яти, нібито статистично значимих зон анізотропії у вертикальному розподілі швидкості звуку, виявилися хибними (закреслені стрілки), а дві з недооцінених зон, які вважалися ізотропними, з'ясувалися анізотропними (чорні стрілки).

Висновки

Мінливість морського середовища як у просторі так і у часі має різні просторово-часові масштаби, які визначаються, в основному, географічно-кліматичним положенням акваторії та наявністю фронтальних зон (витоки річкової води, підземних вод, теплих чи холодних течій, вихрових утворень), чи їх відсутністю (більша частина Світового океану). Однією з первинних характеристик морського середовища є швидкість звуку, яка дуже чутливо відображає найменші його зміни. Причому, ця характеристика є інтегральною, цілісною. Вона нероздільно характеризує стан системи, який формується цілим комплексом впливів та реакцій на них. Розділяючи впливи та реакції на, відомі нам на даному етапі розвитку науки фізики, так звані, температуру, солоність, тиск ми нібито спрощуємо систему та її розуміння, а насправді заплутуємося, надаючи якомусь із факторів дуже великого, чи дуже малого значення (можливостей впливу на систему). Тобто, губимо орієнтацію, а значить рухаємося у своєму розумінні процесу чи явища не у тому напрямку, причому інколи дуже довго. Наприклад усім відомо, що морська вода дуже складна система. І на даному етапі її розуміння стає очевидним, що неврахування нано- та надмолекулярних фізико-хімічних процесів, що відбуваються у цьому середовищі при розповсюдженні в ній акустичної хвилі, призводить до великої різниці між

результатами, отриманими теоретично та вимірними у натурних умовах. Інколи ця різниця досягає 300 і більше відсотків. Однак, гідроакустика як спосіб дослідження водного середовища, вже більше століття надто затребувана для безпеки мореплавства, особливо, її військова прикладна частина. Це стосується пошуку та ідентифікації підводних човнів або виявлення морських мін, об'єктів підводного орієнтування чи інших воєнних засобів. Тому, не вникаючи в нюанси особливостей морського середовища та його реакцій на зовнішній вплив, загальноприйнятим наразі вважається знаходження та використання певних стійких напівемпіричних залежностей, що допомагають більш ефективно використовувати гідроакустичні засоби для безпеки мореплавства. Наша наукова робота якраз і стосується саме такого підходу до вирішення задачі підвищення ефективності використання гідроакустичних засобів, використовуючи методи акустичної томографії. Акустична томографія базується, у тому числі, на аналізі прийнятого сигналу (від джерела опромінення) на предмет оцінки змін його характеристик після проходження через водний простір, а саме - просторові зміни вертикального розподілу швидкості звуку, як його інтегральної характеристики.

Таким чином, у результаті теоретичних досліджень у напрямку пасивної акустичної томографії, методами моделювання рефракції акустичних хвиль, нами вперше визначено новий тип кількісної характеристики акустичного поля. Запропоновано принцип визначення відповідної опорної характеристики акустичного поля, на підставі чого розроблене підґрунтя для створення алгоритмів відновлення вертикального розподілу швидкості звуку. Розроблено один з низки алгоритмів визначення просторової ізотропності вертикального розподілу швидкості звуку. Впровадження зазначеного алгоритму пасивної акустичної томографії забезпечить корабельні гідролокатори вхідними даними для визначення глибини, відстані до навігаційної перешкоди тощо. Запорукою цього є те, що формалізація розробленого алгоритму визначення змін у просторі фактичної оцінки ширини ЗАТ та їх адаптація до різних районів акваторії – технічно є простою у застосуванні.

Список літератури

1. Joel D Simon, Frederik J. Simons, Jessica C. E. Irving Recording earthquakes for tomographic imaging of the mantle beneath the South Pacific by autonomous MERMAID floats. *Geophysical Journal International*, V. 228. 2022. P. 147–170. doi: 10.1093/gji/ggab271.
2. Sirawich Pipatprathanporn, Frederik J Simons. One year of sound recorded by a MERMAID float in the Pacific: hydroacoustic earthquake signals and infrasonic ambient noise. *Geophysical Journal International*. 2022. Vol. 228. P. 193–212. doi: 10.1093/gji/ggab296.
3. Schneider Jens, Greinert Jens, Chapman N. R. Rabbell, Wolfgang and Linke Peter. Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: Sensing bubbles under control of

- variable currents. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2010. Vol. 8. P. 155–171. doi: 10.4319/lom.2010.8.155.
4. Muriel Dunn, Len Zedel. Evaluation of discrete target detection with an acoustic Doppler current profiler. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2022. Vol. 20. P. 249–259. doi:10.1002/lom3.10484.
 5. Joel Simon Frederik Simons Guust Nolet. Multiscale Estimation of Event Arrival Times and Their Uncertainties in Hydroacoustic Records from Autonomous Oceanic Floats. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020. P. 970–997. doi: 10.1785/0120190173.
 6. Junki Baek, Byungjun Kang, Chanryeol Rhyou, Hyungsuk Lee. Effect of the sound speed mismatch between fluid and channel on the particle alignment in a standing surface acoustic wave device. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021. P. 346. doi: 10.1016/j.snb.2021.130442.
 7. LinZhang, Liang-long Da, Xue-hai Sun, Wen-jing Chen. A hybrid algorithm of underwater structure vibration and acoustic radiation-propagation in ocean acoustic channel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2020. Vol. 12. P. 680–690. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.07.008.
 8. Hyungbeen Lee, Hyoung Sul La, Donhyug Kang, Sang Hoon Lee. Vertical distribution of the sound-scattering layer in the Amundsen Sea, Antarctica. *Polar Science*. 2018. Vol. 15, P. 55–61. doi: 10.1016/j.polar.2017.12.003.
 9. Elson La, Manik Henry M. Hestirianoto Totok, Pujiyati Sri. Quantification Of Seabed Acoustic Backscatter Strength Using Scientific Single Beam Echosounder. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*. 2022. Vol. 14. P. 15–30. doi: 10.29244/jitkt.v14i1.37184.
 10. Lubis M. Z., Anurogo W., Chayati S. N., Sari L. R., Taki H. M. And S Pujiyati. Side-scan sonar investigations and marine seismic of identification object(Conference Paper). *Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1442, Basic and Applied Sciences Interdisciplinary Conference*. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/1442/1/012004.
 11. Гончаров В. В., Курьянов Б. Ф. Локальная акустическая томография неоднородностей в придонном термоклин мелкого моря. *Акустика океана, доклады XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских*. Москва: ГЕОС, 2011. С. 193–196.
 12. Гончаров В. В., Куртепов В. М. Численные эксперименты по томографии океана. *Акустика океанской среды. Под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой*. Москва: Наука, 1989. С. 107–115.
 13. Шевченко А., Стародубцев П., Бакланов Е. Акустическая томография океана и упрощенный инструментальный ее реализации в мультистатической схеме с целью обеспечения безопасности мореплавания. *Геология*. 2015. С. 154
 14. Буров В. А., Попов А. Ю., Сергеев С. Н., Шуруп А. С. Акустическая томография океана при использовании нестандартного представления рефракционных неоднородностей. *Акустический журнал*. 2005. Т. 51. № 5. С. 602–613.
 15. Гончаров В. В., Чепурин Ю. А., Годин О. А. Пассивная акустическая томография океана при использовании антенн неизвестной формы. *Акустический журнал*. 2013. URL: <https://naukarus.com/passivnaya-akusticheskaya-tomografiya-okeana-pri-ispolzovanii-antenn-neizvestnoy-formy>.
 16. Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Акустическая модель квазистационарных трасс. Ч. 1 Концепция исследований. *Гидроакустичний журнал*. 2009. № 6. С. 10–23.
 17. Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Акустическая модель квазистационарных трасс. Ч.2. Оценка физической адекватности акустической модели. *Гидроакустичний журнал*. 2010. № 7. С. 58–72.

References (transliterated)

1. Joel D. Simon, Frederik J. Simons, Jessica C. E. Irving Recording earthquakes for tomographic imaging of the mantle beneath the South Pacific by autonomous MERMAID floats. *Geophysical Journal International*, 2022, Vol. 228, pp. 147–170, doi: 10.1093/gji/ggab271.
2. Sirawich Pipatprathanporn, Frederik J. Simons. One year of sound recorded by a MERMAID float in the Pacific: hydroacoustic earthquake signals and infrasonic ambient noise. *Geophysical Journal International*, 2022, Vol. 228, pp. 193–212, doi:10.1093/gji/ggab296.
3. Schneider Jens, Greinert Jens, Chapman N. R. Rabbel, Wolfgang and Linke Peter. Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: Sensing bubbles under control of variable currents. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2010, Vol. 8, pp. 155–171. doi: 10.4319/lom.2010.8.155.
4. Muriel Dunn, Len Zedel. Evaluation of discrete target detection with an acoustic Doppler current profiler. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2022, Vol. 20, pp. 249–259, doi: 10.1002/lom3.10484.
5. Joel Simon, Frederik Simons, Guust Nolet. Multiscale Estimation of Event Arrival Times and Their Uncertainties in Hydroacoustic Records from Autonomous Oceanic Floats. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, pp. 970–997, doi: 10.1785/0120190173.
6. Junki Baek, Byungjun Kang, Chanryeol Rhyou, Hyungsuk Lee. Effect of the sound speed mismatch between fluid and channel on the particle alignment in a standing surface acoustic wave device. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, pp. 346, doi: 10.1016/j.snb.2021.130442.
7. Lin Zhang, Liang-long Da, Xue-hai Sun, Wen-jing Chen. A hybrid algorithm of underwater structure vibration and acoustic radiation-propagation in ocean acoustic channel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020, Vol.12, pp. 680–690, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.07.008.
8. Hyungbeen Lee, Hyoung Sul La, Donhyug Kang, Sang Hoon Lee. Vertical distribution of the sound-scattering layer in the Amundsen Sea, Antarctica. *Polar Science*, 2018, Vol. 15, pp. 55–61, doi: 10.1016/j.polar.2017.12.003.
9. Elson La, Manik Henry M., Hestirianoto Totok, Pujiyati Sri. Quantification Of Seabed Acoustic Backscatter Strength Using Scientific Single Beam Echosounder. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 2022, Vol. 14, pp. 15–30, doi 10.29244/jitkt.v14i1.37184.
10. Lubis M. Z., Anurogo W., Chayati S. N., Sari L. R., Taki H. M. And S Pujiyati. Side-scan sonar investigations and marine seismic of identification object(Conference Paper). *Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1442, Basic and Applied Sciences Interdisciplinary Conference*, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/1442/1/012004.
11. Goncharov V. V., Kuryanov B. F. Lokal'naya akusticheskaya tomografiya neodnorodnostej v pridonnom termokline melkogo moray [Local acoustic tomography of inhomogeneities in the near-bottom thermocline of a shallow sea]. *Acoustics of the ocean, reports of the XIII*

- school-seminar. acad. L. M. Brekhovskiy*. Moscow. GEOS 2011, pp. 193–196.
12. Goncharov B. V., Kurteпов B. M. Chislennyye eksperimenty po tomografii okeana [Numerical experiments on ocean tomography]. *Acoustics of the ocean environment*. Ed. L.M. Brekhovskikh and I.B. Andreeva, Moskwa. Science. 1989, pp. 107–115.
 13. Shevchenko A., Starodubtsev P., Baklanov E. Akusticheskaya tomografiya okeana i uproshchennyj instrumentarij ee realizacii v mul'tistaticheskoy skheme s cel'yu obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya [Acoustic tomography of the ocean and simplified tools for its implementation in a multistatic scheme to ensure the safety of navigation]. *Geology*, 2015, p. 154.
 14. Burov V. A., Popov A. Yu., Sergeev S. N., Shurup A. S. Akusticheskaya tomografiya okeana pri ispol'zovanii nestandartnogo predstavleniya refrakcionnyh neodnorodnostej [Acoustic ocean tomography using a non-standard representation of refractive inhomogeneities]. *Acoustic magazine*, 2005, Vol. 51, no. 5, pp. 602–613.
 15. Goncharov V. V., Chepurin Yu. A., Godin O. A. Passivnaya akusticheskaya tomografiya okeana pri ispol'zovanii antenn neizvestnoj formy [Passive acoustic tomography of the ocean using antennas of unknown shape]. *Acoustic magazine*, 2013. Available at: <https://naukarus.com/passivnaya-akusticheskaya-tomografiya-okeana-pri-ispol'zovanii-antenn-neizvestnoj-formy>
 16. Zamarenova L. N., Skipa M. I. Akusticheskaya model' kvazistacionarnyh trass. [Acoustic model of quasi-stationary paths]. Part 1. The concept of research. *Hydroacoustic journal*, 2009, no. 6, pp. 10–23.
 17. Zamarenova L. N., Skipa M. I. Akusticheskaya model' kvazistacionarnyh trass. [Acoustic model of quasi-stationary paths]. Part 2. Assessment of the physical adequacy of the acoustic model. *Hydroacoustic journal*, 2010, no. 7, pp. 58–72.

Відомості про авторів (About authors)

Капочкіна Анастасія Борисівна – аспірант НУ «ОМА»; засновник Мале Приватне Підприємство «Трансконтинентальне сейсмопрогнозове бюро», м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0001-7130-160X; e-mail: nastia-82@ukr.net

Капочкіна Анастасія – post-graduate student at National University of Odesa Maritime Academy; founder firm «Transcontinental Seismological Bureau», Odesa, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7130-160X; e-mail: nastia-82@ukr.net

Капочкіна Маргарита Борисівна – к.т.н., науковий співробітник НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» Інституту військово-морських сил Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-4893-2523; e-mail: margo-92@ukr.net

Капочкіна Маргарита – Ph. D., researcher, Scientific-research center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of Military and Naval Forces of the National University of Odesa Maritime Academy, Odesa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4893-2523; e-mail: margo-92@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Капочкіна А. Б., Капочкіна М. Б. Алгоритм акустичної томографії з визначення просторової ізотропності гідроакустичного поля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 41-49. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.07.

Please cite this article as:

Капочкіна А., Капочкіна М. Acoustic tomography algorithm for determining the spatial isotropicity of the hydroacoustic field. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 41–49, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.07.

Надійшла (received) 29.08.2022