

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗВУКУ В ШЕЛЬФОВІЙ ЗОНІ ЧОРНОГО МОРЯ

М.Б. Капочкіна¹, Н.В. Кучеренко²

¹ канд. техн. наук, доцент кафедри «Навігація і керування судном»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0009-9461-1411

² канд. географ. наук, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру
Збройних Сил України «Державний океанаріум»,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-9770-3284

Анотація

Дальність розповсюдження звуку в океанах і морях є найважливішою гідроакустичною характеристикою, від якої залежить ефективність шумопеленгації, гідролокації, щільність мережевих гідроакустичних систем інформаційного шару (позиціонування та зв'язок) автоматизованої системи ідентифікації суден. Розглянуто два методологічних (теоретичних) аспекти визначення дальності розповсюдження звуку. Перший аспект – це визначення дальності звуку, як функції, що залежить від частоти акустичної хвилі. Другий – визначення дальності розповсюдження акустичних хвиль різних довжин, як константи кількості циклів (довжин хвиль). Для умов мілководдя, дальність розповсюдження акустичних хвиль додатково підпадає під суттєву залежність від таких гідроакустичних характеристик ґрунтів, як кількісні показники відбиття та поглинання звуку, а також від показника розсіяння звуку морською поверхнею. Отримання оцінки дальності розповсюдження звуку на мілководді має виключно експериментальне вирішення. Для глибин 10–20 м така оцінка була отримана. На глибинах більше 50 м, де може існувати підводний звуковий канал, дальність розповсюдження акустичних хвиль може бути визначена теоретичними методами. В роботі наведено результати експериментального визначення дальності розповсюдження звуку на глибинах від 20 м до глибин можливого формування хвильоводу. Експеримент було виконано для герцевого діапазону частот, який відповідно теорії дальності розповсюдження акустичних хвиль різних довжин, як константи кількості циклів (довжин хвиль), забезпечує максимальну дальність звукопідводного зв'язку, гідролокації та шумопеленгації. Обробка даних гідроакустичного експерименту з визначення дальності розповсюдження звуку передбачає урахування рефракції акустичних хвиль, що формує зони акустичної тіні. Для визначення дальності розповсюдження звуку запропоновано визначати акустичну сигнатуру (амплітудний спектр), осереднену за певний час, з подальшим виявленням амплітуд тестових частот, як показників інтенсивності акустичного сигналу.

Ключові слова: гідроакустика, автоматизовані системи ідентифікації суден, поглинання звуку, дальність розповсюдження звуку, морська навігація, донна гідроакустична інфраструктура, безпека судноплавства.

**RESULTS OF AN EXPERIMENT TO DETERMINE THE RANGE OF SOUND
PROPAGATION IN THE SHELF ZONE OF THE BLACK SEA**

M.B. Kapochkina¹, N.V. Kucherenko²

¹ candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Navigation and Ship Management”,

Odessa National Maritime University,

ORCID ID: 0009-0009-9461-1411

² candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher of the Naval Research Center of the Armed Forces of Ukraine “State Oceanarium”,

National University “Odesa Maritime Academy”

ORCID ID: 0000-0002-9770-3284

Summary

The sound propagation range in the oceans and seas is the most important hydroacoustic characteristic, on which the efficiency of noise-scattering, sonar, density of network hydroacoustic systems of the information layer (positioning and communication) of the automated ship identification system depends. Two methodological (theoretical) aspects of determining the sound propagation range are considered. The first aspect is the determination of the sound propagation range as a function that depends on the frequency of the acoustic wave. The second is the determination of the propagation range of acoustic waves of different lengths as a constant of the number of cycles (wavelengths). For shallow water conditions, the propagation range of acoustic waves is additionally subject to significant dependence on such hydroacoustic characteristics of soils as quantitative indicators of sound reflection and absorption, as well as on the indicator of sound scattering by the sea surface. Obtaining an estimate of the sound propagation range in shallow water has an exclusively experimental solution. For depths of 10–20 m, such an estimate was obtained. At depths of more than 50 m, where an underwater sound channel may exist, the propagation range of acoustic waves can be determined by theoretical methods. The paper presents the results of experimental determination of the propagation range of sound at depths from 20 m to the depths of possible formation of a waveguide. The experiment was performed for the hertz frequency range, which, according to the theory of the propagation range of acoustic waves of different lengths, as a constant of the number of cycles (wavelengths), provides the maximum range of underwater sound communication, sonar and noise direction finding. Data processing of the hydroacoustic experiment to determine the propagation range of sound involves taking into account the refraction of acoustic waves, which forms acoustic shadow zones. To determine the propagation range of sound, it is proposed to determine the acoustic signature (amplitude spectrum), averaged over a certain time, with subsequent detection of the amplitudes of test frequencies as indicators of the intensity of the acoustic signal.

Key words: hydroacoustics, automated vessel identification systems, sound absorption, sound propagation range, maritime navigation, bottom hydroacoustic infrastructure, shipping safety.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження акустичних характеристик води шельфових зон пов'язана з перспективою розгортання донної

інфраструктури з гідроакустичних засобів спостереження. Щільність зазначених систем обумовлена дальністю розповсюдження звуку у воді. На відміну від глибоководних районів, де за наявності хвильоводу дальність розповсюдження звуку може досягати сотень кілометрів, у мілководній шельфовій зоні дальність розповсюдження звуку вимірюється кілометрами. У районах мілководдя дальність розповсюдження звуку у воді залежить від глибини, типу рефракції акустичних хвиль, акустичних властивостей донних відкладень, стану морської поверхні тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконалення методик отримання чисельних оцінок дальності розповсюдження звуку потребує насамперед визначення сучасного стану розрахункових та експериментальних технологій отримання даних про дальність розповсюдження звуку у воді. Базові положення гідроакустики викладені в роботі [1]. Важливі питання акустики мілкого моря розглянуті в монографії [2]. Один із варіантів розрахунку коефіцієнта поглинання звуку у воді, як функції частоти релаксації, частоти гідролокації, тиску (глибини), температури, солоності та концентрації у воді іонів водню, наведений у роботі [3]. Проаналізуємо формулу розрахунку коефіцієнта поглинання звуку у воді

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \left(\frac{S}{35} \right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-D/6} + 0.00049 f^2 e^{-(T/27 + D/17)}, \quad (1)$$

де: f – частота гідролокації;

f_1 – частота релаксації;

D – глибина;

T – температура води;

S – солоність води;

pH – від’ємний логарифм концентрації іонів водню у воді.

Зазначена формула є емпіричною за типом, тому (за визначенням) не обов’язково повинна бути фізично обґрунтованою. За законами фізики затування звуку в рідині пропорційне показникам її зсувної та об’ємної в’язкості. Можна побачити, що коефіцієнт динамічної в’язкості, на жаль, не входить у формулу (1). Водночас слід зазначити, що наявність у формулі (1) температури в показнику ступеня не є фізично обґрунтованою, також не мають строгого фізичного обґрунтування такі параметри, як глибина, солоність і особливо концентрація іонів водню у воді. Фізична необґрунтованість зазначених аргументів функції коефіцієнту поглинання звуку у воді опосередковано підтверджується в роботах [4; 5], де вказано, що для певного діапазону частот (до 100 кГц), коефіцієнт затування звуку можна розрахувати лише як функцію частоти звуку:

$$\beta = 0.036 \cdot f^{3/2} \quad (2)$$

де: β – коефіцієнт затування, дБ/км;

f – частота, кГц.

Тобто навіть застосування частоти релаксації на практиці не є необхідним. Слід зазначити, що в гідроакустичнеому програмному забезпеченні розрахунки енергетичної дальності звукопідводного зв’язку, гідролокації,

шумопеленгації визначаються за вхідними параметрами: частота звукової хвилі, тривалість імпульсу, амплітуда сигналу та коефіцієнт затухання звуку [6]. Таким чином, можна клонстатувати невідповідність теорії затухання звуку практиці розрахунків.

У роботі [3] вказано, що для глибоководних районів на частотах до 100 Гц поглинання звуку, виміряне експериментально, становить 0,00015 дБ/км, а для мілководних районів – 0,002 дБ/км. Проблема збільшення ефекту затухання звуку на мілководді детально розглядається в роботі [4]. У мілководних районах, де формування хвилеводу є малоймовірним, дальність розповсюдження звуку додатково зменшується залежно від акустичних властивостей донних відкладень, стану водної поверхні тощо. Відповідно до [7], після контакту акустичної хвилі з морською поверхнею втрачається приблизно 8 % акустичної енергії, а після контакту фронту акустичної хвилі з дном – 10 % акустичної енергії. Таким чином, чим більша глибина, тим менша кількість контактів акустичної хвилі з морським дном і морською поверхнею, що приводить до менших витрат акустичної енергії. Втрати акустичної енергії від контакту з морською поверхнею можуть поліпшуватися в умовах штильових умов. Аналогічні втрати від контакту з донними відкладеннями для кожного району є незмінними, тому будь-яка акваторія може бути зонованою за цим акустичним критерієм [8].

За нашими оцінками, площа шельфу північно-західної частини Чорного моря з глибинами, що перевищують 20 метрів, де експериментально ще не була визначена дальність дії гідролокаторів, шумопеленгаторів, систем ретрансляції гідроакустичного зв'язку та систем підводного позиціонування, становить приблизно 19 тис. км². Тому нами була поставлена задача визначення дальності розповсюдження акустичних хвиль у шельфовій зоні Чорного моря з глибинами понад 20 м. Слід зазначити, що акустичні характеристики донних відкладень на глибинах 15–20 м, де в поверхневому шарі превалюють алевритові піски, відрізняються від акустичних характеристик мулових відкладень поверхневого шару, які зустрічаються на глибинах понад 30 м. Крім того, слід враховувати не тільки коефіцієнт поглинання звуку, а й коефіцієнт відбиття звукової хвилі від донних відкладень різного типу [9].

На рисунку 1 наведено експериментальні дані визначення коефіцієнта затухання звуку різної частоти в центральній частині Балтійського моря [10].

На рисунку 1 наведено значення коефіцієнта загасання звуку в діапазоні частот 100–5000 Гц, отримані у травні (зачорнені кружки), вересні (показані квадратами) і серпні (зачорнені трикутники). Треба зазначити, що для вересневих умов на частоті 100 Гц коефіцієнт поглинання був 0,08 дБ/км і зменшувався до 0,018 дБ/км на частоті 600 Гц. Зі збільшенням частоти до 1,2 кГц коефіцієнт поглинання збільшився до 0,14 дБ/км з подальшим зменшенням коефіцієнта поглинання до 0,13 дБ/км на частоті 2 кГц. Таким чином, аналіз даних, отриманих із використанням вибухових джерел звуку із застосуванням тональних джерел звуку [10], свідчить про те, що для акустичного сигналу в частотному діапазоні від 100–600 кГц коефіцієнт поглинання звуку зменшувався з підвищенням частоти, що не передбачено формулами (1, 2).

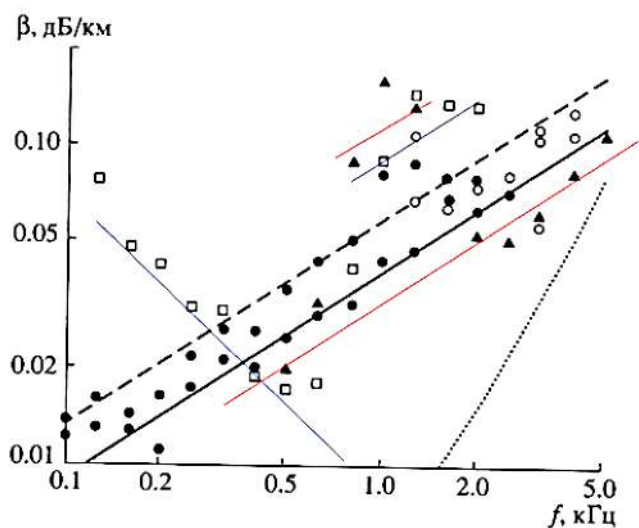


Рис. 1. Експериментальні дані з затухання звуку в центральній частині Балтійського моря з авторськими доробками (виділено кольором) [10]

Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Результати гідроакустичних досліджень у Чорноморському регіоні опубліковані в роботах [4; 11; 12; 13; 14]. Для шельфу коефіцієнт поглинання звуку за емпіричними формулами оцінюється в діапазоні від 0,002 до 0,012 дБ/км. У роботі [4] розглядається питання розповсюдження звуку у хвилеводі, де втрат енергії звуку завдяки відбиттю від морського дна не відбувається. На частотах 0,5–5,0 кГц дальність розповсюдження акустичного сигналу становить: з квітня до серпня – 40 км, з вересня до листопада – до 120 км, з грудня до березня – до 200 км. Той самий колектив авторів у роботах [11; 12] для району з глибинами від 15 до 18,5 м експериментальним шляхом, в умовах зимового періоду, коли звук розповсюджується підповерхневим хвилеводом, показав дальність не 200 км, а в 10 разів меншу. За умов відсутності хвилеводу автори [11; 12] експериментальним шляхом оцінили дальність розповсюдження звуку не 40–120 км, а лише 2–3 км, тобто вже в десятки разів меншу.

У дослідженні використані дані міжгалузевого гідроакустичного експерименту, виконаного за методикою авторів дослідження сертифікованими засобами гідроакустичного висвітлення підводної обстановки й переданими НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» для визначення оцінки дальності розповсюдження звуку. Експеримент виконано в шельфовій зоні Чорного моря на глибині 50 м в осінній період року.

Формулювання цілей статті. Визначення дальності розповсюдження звуку в реальних умовах рефракції акустичних хвиль (викривлення акустичних променів) ускладнено негативним впливом зон акустичної тіні. У роботі розглядається спрощений (променевий) варіант оцінки умов звукового «опромінення» водного середовища. Променева методика обробка експериментальних даних, отриманих в умовах наявності зон акустичної тіні як зон низької просторової щільності акустичних променів, досі не запропонована. Експериментальне визначення дальності

дії гідроакустичних засобів моніторингу / спостереження в підводних системах у мілководних районах повинно містити розрахунок траєкторій розповсюдження акустичних променів. Важливо враховувати, що розрахунок траєкторій акустичних променів завдяки відсутності дисперсії звуку у воді є уніфікованим у всьому частотному діапазоні, тобто не залежить від частоти акустичного сигналу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо головні принципи обробки даних акустичних вимірювань дальності розповсюдження звуку вздовж акустичної траси. Гідроакустичними дослідженнями вздовж акустичних трас займалися автори робіт [15; 16; 17; 18]. Нами в експерименті з вимірювання дальності розповсюдження звуку було задіяне судно як платформа штучного джерела акустичних сигналів із частотою 80 Гц та чотири засоби шумопеленгації. Засоби шумопеленгації були встановлені вздовж акустичної траси з дискретністю 4 км. У процесі руху судна засобами шумопеленгації фіксувалися зміни потужності акустичного сигналу.

На рис. 2 показано зміни в часі амплітуди шумів, які реєструвалися засобами шумопеленгації.

Дані реєстрації шумів приймалися в центрі обробки даних радіоканалом і з метою виділення тестових акустичних хвиль у реальному масштабі часу оброблялися методом спектрального аналізу. З метою усунення впливу коливань амплітуди акустичної хвилі за умов інтерференції, яка в умовах багатопроневості проявляється підвищенням і послабленням амплітуди звуку вздовж акустичного променя (у місцях перетину променів різних напрямків), отриманий сигнал (розглядався в інтервалі довжин хвиль 5–20 м) осереднювався з вікном просторового осереднення 600 метрів (швидкість судна 4 вузли, період осереднення – 300 секунд). Зразок оцінки амплітудного спектра шумів показано на рис. 3.

На рисунку 3 виділяються лише стабільні в часі й суто періодичні шуми. Це штучне джерело шумів – частота 80 Гц та шуми носія джерела шумів у діапазонах частот 200–210 та 235–245 Гц. Для зазначених частот (80, 205, 240 Гц) були розраховані теоретичні оцінки дальності розповсюдження звуку в умовах хвильоводу за різними методиками.

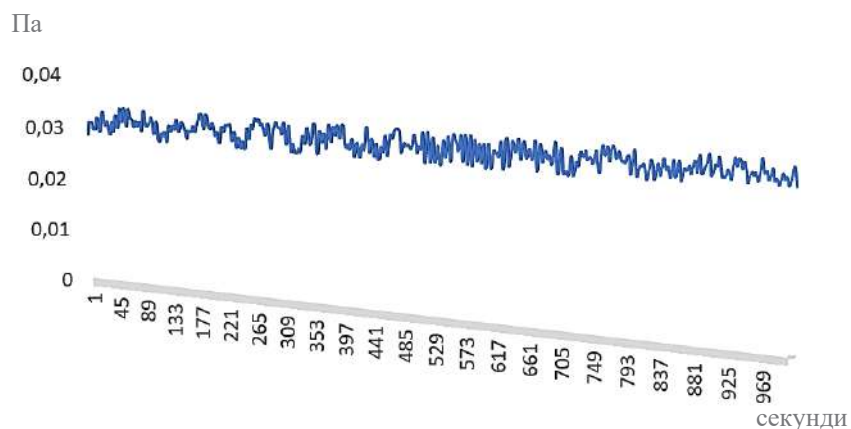


Рис. 2. Зміни у часі амплітуди шумів, які реєструвалися засобами шумопеленгації

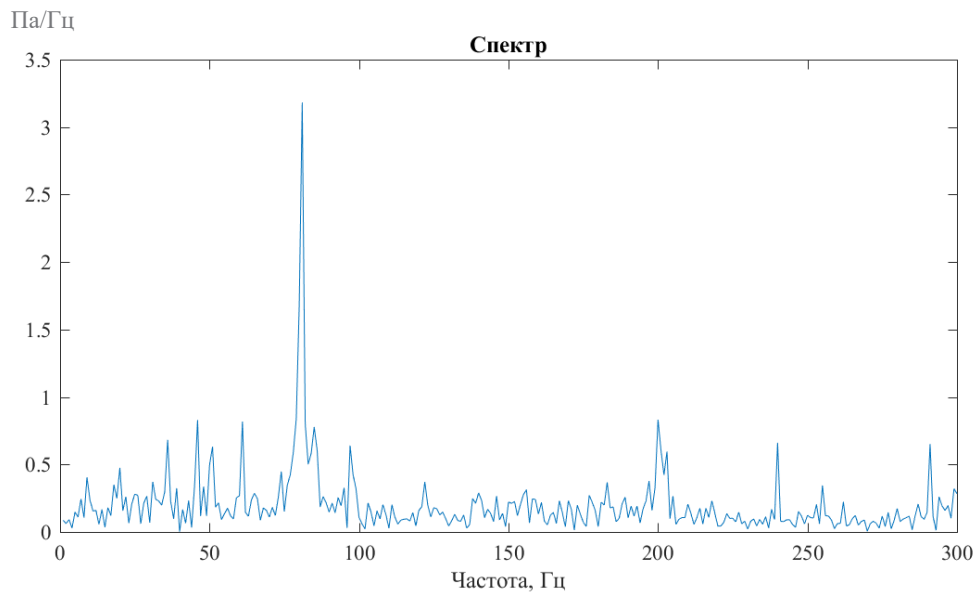


Рис. 3. Зразок амплітудного спектра шумів

Таблиця 1

**Дальність (км) розповсюдження звуку на частотах 80, 205, 240 Гц,
розрахована за різними методиками**

Частота / довжина акустичної хвилі, Гц/м	За методом [19]	За методом [4]	За методом [20]
80/19	~ 1300	—	200
205/7,5	~ 500	—	—
240/6,4	~ 400	200	—

Таким чином встановлено, що в умовах виконання акустичного експерименту на глибокій воді, але без хвильоводу можна очікувати дальність розповсюдження на сотні кілометрів. Для зазначених частот нами виконані розрахунки втрати / поглинання дБ/км за формулами [3; 21; 22; 23] (рис. 4).

Розрахунки за емпіричними формулами, наведеними в зазначених публікаціях, були виконані з використанням кліматичних даних в одноградусному квадраті Марсдена № 17859, у межах якого проводився гідроакустичний експеримент з визначення дальності розповсюдження звуку. Також було розраховано просторові зміни показника ослаблення акустичного сигналу вздовж акустичної траси, яка мала довжину 12 км. За даними розрахунків для діапазону частот 80–240 Гц показник ослаблення на відстані 12 км становив 40,8–40,87 Дб.

Розглянемо дані експериментального визначення дальності розповсюдження звуку вздовж зазначеної акустичної траси. Зауважимо, що для глибин менше 18 м дальність розповсюдження звуку в теплий сезон року не перевищувала 3–4 км [11; 12]. На рисунку 5 показані результати змін амплітуди спектрів на частотах 80, 205 та 240 Гц залежно від відстані між випромінювачем і приймачем (у метрах).

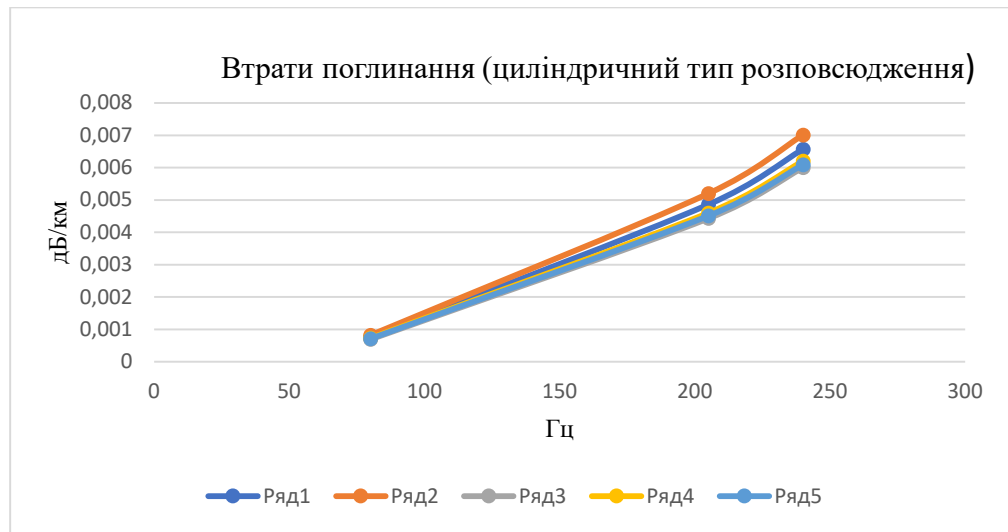
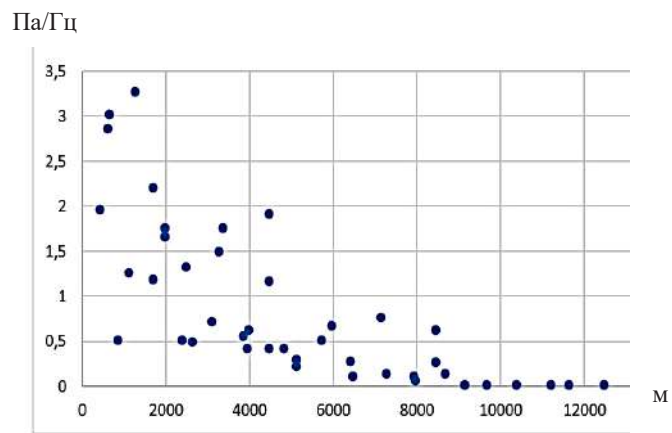
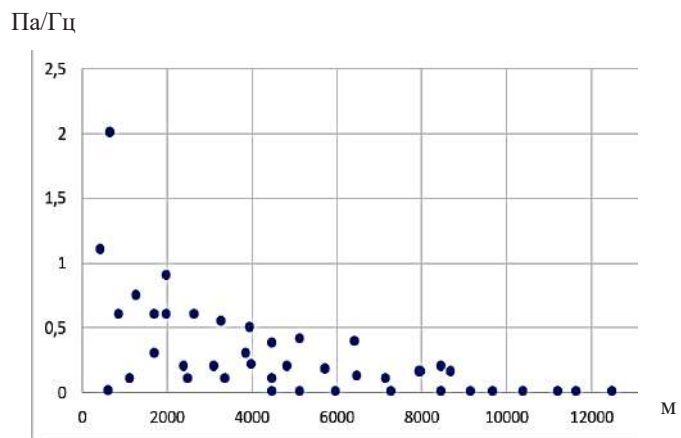


Рис. 4. Втрати / поглинання звуку дБ/км (циліндричний тип розповсюдження) залежно від частоти випромінювання в Гц (1 – Thorp, 2 – Schulkin, 3 – Fisher, 4 – Francois, 5 – Ainslie [20])

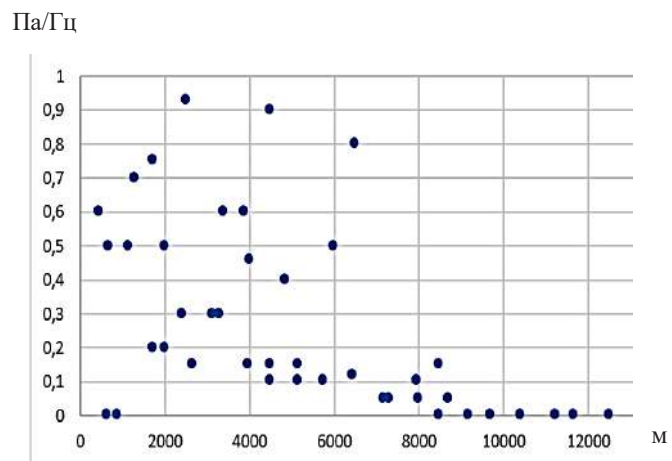
Дальність розповсюдження звуку (пороговий рівень 0,5) на частоті 80 Гц була близька до 8 км, на частотах 205–240 Гц – до 4–6 км. Важливо звернути увагу, що початкова амплітуда спектру шумів платформи на частотах 205 і 240 Гц приблизно у три рази нижча порівняно з потужністю штучного випромінювання на частоті 80 Гц. Однак експериментально зафіксована дальність розповсюдження звуку на цих частотах на мілководді відрізняється не так сильно. На нашу думку, саме кількість дотиків до дна та поверхні визначає швидкість зменшення енергії звуку. Тобто у спрощеному, променевому варіанті саме рефракція (вертикальний тип розподілу швидкості звуку з глибиною) відіграє ключову роль у можливостях передачі звукової енергії в шельфових зонах морів, де втрати енергії за взаємодії з дном максимальні. Це має підтвердження і в результатах наших розрахунків, наведених на рисунку 5, де просторові зміни показника ослаблення акустичного сигналу (чисельного значення амплітудного спектру) вздовж акустичної траси, яка мала довжину 12 км, відповідно до методики [20] практично не відрізняються для частот 80, 205 та 240 Гц: 40,8; 40,85; 40,87 відповідно. Адже, за нашими розрахунками, максимальні дальності розповсюдження акустичної енергії в глибокому морі, які залежать від кількості циклів в певному середовищі (у воді 66 666 циклів у герцевих діапазонах [19]) для вказаних частот близькі до 1200, 500 та 400 км відповідно (див. табл. 1). У роботі [24] наведено дані про поглинання звуку на частотах 516 та 1550 Гц. На частоті 516 Гц дальність фіксації звуку становить 4,5 км, на частоті 1550 Гц – до 2,5 км). Аналіз отриманих даних дав змогу також виявити певні методичні проблеми. Можна побачити, що на фіксованій відстані від джерела звуку різні приймачі фіксували різну потужність сигналу. Це явище для умов шельфу Чорного моря детально розглянуто в роботах [12; 25]. Це явище призводить до штучного епізодичного зменшення дальності розповсюдження звуку.



а



б



в

Рис. 5. Результати вимірювання амплітуди спектрів залежно від відстані між випромінювачем і приймачами (3 приймачі) на частотах:
а) 80 Гц, б) 205 Гц, в) 240 Гц

Тенденції просторових змін амплітуди акустичного сигналу навколо джерела звуку мають лінійний характер. Виходячи із цього, вважається правомірною апроксимація зміни чисельного значення амплітудного спектра отриманого сигналу залежно від відстані від випромінювача лінійною функцією.

На рис. 6 показані результати змін амплітуд спектрів на частоті 80 Гц залежно від відстані між випромінювачем і приймачем.

Зміни вздовж акустичної траси показника амплітудного спектра потребують обґрунтованого алгоритму обробки даних. Вважалося б очевидним провести апроксимацію отриманих даних за методом найменших квадратів, як це показано на рисунку 6 пунктирною лінією. За таким методичним рішенням оброблені дані наведені пунктирною лінією. Але слід зауважити, що метод апроксимації зазначеного типу даних не є припустимим, оскільки отримані на однаковій відстані показники амплітудного спектра на частоті 80 Гц є різними не з причини розбігу за теорією вірогідності, а з відомої фізичної причини – рефракції звуку. Через рефракцію звуку у воді в певні точки акустичної траси на глибині встановленого гідрофона акустичні промені не приходять або приходять зі зменшеною щільністю. Таким чином, за умов рефракції отримані результати апроксимуються за максимальними значеннями амплітуд спектральної оцінки шумів. Така апроксимація на графіку показана суцільною лінією (див. рис. 6).

Для частоти 80 Гц було розраховано аналітичне рівняння залежності амплітуди спектра сигналу A (Па/Гц) від відстані L (км) до джерела звуку в умовах шельфу Чорного моря (глибини 40–50 м) для осіннього періоду (жовтень), яке має такий вигляд:

$$A = 3,64 - 0,36 \times L. \quad (3)$$

Оцінка достовірності отриманого рівняння (3) підтверджується:
коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,99$;
коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = -0,99$.

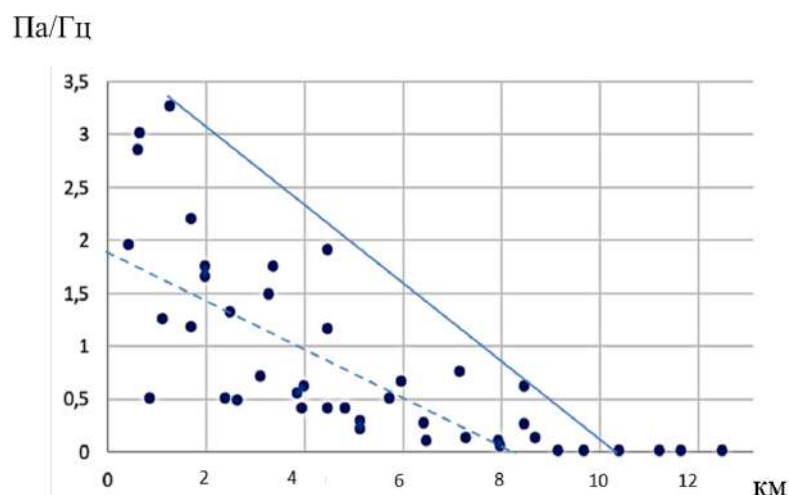


Рис. 6. Результати вимірювання амплітуд спектрів залежно від відстані між випромінювачем і приймачем на частоті 80 Гц

Висновки. Аналіз результатів застосування різних емпіричних рівнянь із визначення дальності розповсюдження звуку у воді дає підстави вважати, що коректних розрахункових методів досі не існує. Теоретичний метод визначення максимально можливої дальності розповсюдження акустичних хвиль різних довжин як константи кількості циклів (довжин хвиль) дає достовірний результат для розповсюдження акустичних хвиль лише у хвилеводі. У мілководних районах дальність розповсюдження звуку залежить обернено пропорційно від кількості перевідбиттів акустичних променів від дна та водної поверхні, яка збільшується зі зменшенням глибини. Так, у герцевому діапазоні частот дальність звуку на глибинах 10–20 м не перевищує 4 км, а на глибинах понад 40 м оцінюється вже як 6–8 км. Результатами виконаних досліджень показано, що тривіальне вимірювання дистанції, на якій амплітуда коливань акустичного тиску зменшується нижче за критичне значення, не є коректним за умов існування зон акустичної тіні. У спрощеному варіанті променевої гідроакустики для частоти 80 Гц запропоновано аналітичне рівняння залежності амплітуди спектра отриманого сигналу від відстані до джерела звуку в умовах шельфу Чорного моря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical foundations of ocean acoustics. *Gidrometeo*. 1982. 260 p.
2. Katsnelson B.G., Petnikov V.G. Acoustics of the shallow sea. Monograph. 1997. 191 p.
3. Ainslie M.A., McColm J.G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103 (3). P. 1671–1672.
4. Богушевич Б. К., Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Дальнє поширення звуку в приповерхневому підводному звуковому каналі північно-західної частини Чорного моря. *Акустичний симпозіум «Консонанс-2005»*. С. 84–89.
5. Cherepantsev A.S. Numerical model of attenuation of acoustic waves in the sea. *Anniversary issue “NELAX-2003”*. P. 107–1116.
6. Mytko A.V., Popov N.N. Laboratory workshop on the discipline “Marine Information Systems”. 2013. 64 p.
7. Underwater_acoustics. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustics (дата звернення 01.07.2025).
8. Фесюнов О. Е. Геоэкология північно-західного шельфа Чорного моря. Монографія : АстроПринт. 2000. 100 с.
9. Materials of the second section of the scientific and technical conference “Technical Problems of Marine Resources Development”. September 5 to 30 and October 4, 2013. P. 49–54.
10. Radov V.A. Long-range propagation of sound in the central part of the Baltic Sea. *Acoustic journal*. 2001. Vol. 47. P. 189–199.
11. Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Акустична модель квазістаціонарних трас. Частина 1. Концепція досліджень. *Гідроакустичний журнал*

- (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану) : зб. наук. пр. Запоріжжя : НТЦ ПАС НАН України, 2009. № 6. С. 10–23.
12. Замаренова Л. Н., Скіпа М. И. Акустична модель квазістаціонарних трас. Частина 2. Оцінка фізичної адекватності акустичної моделі. *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)* : зб. наук. пр. Запоріжжя : НТЦ ПАС НАН України, 2010. № 7. С. 58–72.
 13. Burenkov S., Dubrovsky N., Sabinin K. Acoustic monitoring of the Black Sea. Problems of the Black Sea. *International Conference*. Sebastopol. Ukraine. November 10–15. 1992. P. 101–110.
 14. Дивізійнюк М. М. Акустичні поля Чорного моря. Держокеанаріум. 1998. 352 с.
 15. Бункин Ф. Б., Кравцов Ю. А., Омельченко Н. Н., Петников В. Г., Шмелев А. Ю. Результати дослідження стабільності звукових сигналів на стаціонарних акустичних трасах. *Акустичні хвилі в океані*. Наука. 1987. С. 84–91.
 16. Babiy V.I., Burlakova I.B., Virovlyansky A.L., Demikhovskiy S.V., Kravtsov Yu.A., Kukushkin V.D., Petnikov V.G., Rivelis E.A., Slavinsky M.M., Smirnov N.M., Farfel V.A., Shmelev A.Yu. Stationary acoustic path Crimea-Caucasus . Acoustics of the ocean environment. *Science*. 1989. P. 75–79.
 17. Furduev A.V. Acoustic monitoring of underwater environment variability (experimental verification of new methods). *Acoustic Journal*. 2001. Vol. 47 (3). P. 422–430.
 18. Belogortsev A.S., Belov A.I., Zhuravlev V.A., Khokha Yu.V. Acoustic models of shelf marine waters and the problem of their physical adequacy. Proceedings of the Nizhny acoustic scientific session. 2002. P. 64–67.
 19. Кучеренко Н. В., Капочкін Б. Б., Капочкіна М. Б. Прикладні аспекти закономірності процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді. *Водний транспорт*. 2025. Випуск 2 (43). С. 20–30. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.02.
 20. Ocean Acoustics/Underwater Acoustics. URL: <http://www.tsuchiya2.org/> (дата звернення 02.07.2025).
 21. Fisher F.H., Simmons V.P. Sound absorption in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1977. Vol. 62. P. 558–564.
 22. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1982. Vol. 72 (3). P. 896–907.
 23. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1982. Vol. 72 (6). P. 1879–1890.

24. Богушевич Б. К., Замаренова Л. М., Скіпа М. І. Структура звукового поля на шельфі північно-західної частини Чорного моря: експеримент Консонанс-2005. С. 182–188.
25. Гладких І. І., Каналюк О. В., Капочкін Б. Б. Вплив рефракції звуку в Азово-Чорноморському районі на ефективність пошуку цілей гідролокаторами кругового огляду. *ScienceRise*. 2018. № 2. С. 14–18.

REFERENCES

1. Brekhovskikh, L.M., Lysanov, Yu.P. (1982). Theoretical foundations of ocean acoustics. *Gidrometeo*. 1982. 260 p.
2. Katsnelson, B.G., Petnikov, V.G. (1997). Acoustics of the shallow sea. Monograph. 191 p.
3. Ainslie, M.A., McCole, J.G. (1998). A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103 (3), 1671–1672.
4. Bogushevich, B.K., Zamarenova, L.N., Skipa, M.I. Long-range sound propagation in the near-surface underwater sound channel of the northwestern part of the Black Sea [Dalnie poshyrennia zvuku v prypoverkhnevomu pidvodnomu zvukovomu kanali pivnichno-zakhidnoi chastyny Chornoho moria]. Acoustic Symposium “Consonance-2005” (P. 84–89) [in Ukrainian].
5. Cherepantsev, A.S. Numerical model of attenuation of acoustic waves in the sea. Anniversary issue “NELAX-2003”. P. 107–1116.
6. Mytko, A.V., Popov, N.N. (2013). Laboratory workshop on the discipline “Marine Information Systems”. 64 p.
7. Underwater_acoustics. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustics (accessed 01.07.2025).
8. Fesyunov, O.E. (2000). Geoecology of the Northwestern Shelf of the Black Sea [Heoekolohiia pivnichno-zakhidnoho shelfa Chornoho moria]. Monograph: AstroPrint. 100 p. [in Ukrainian].
9. Materials of the second section of the scientific and technical conference “Technical Problems of Marine Resources Development”. September 5 to 30 and October 4, 2013 (P. 49–54).
10. Radov, V.A. (2001). Long-range propagation of sound in the central part of the Baltic Sea. *Acoustic journal*, 47, 189–199.
11. Zamarenova, L.N., Skipa, M.I. (2009). Acoustic model of quasi-stationary paths. Part 1. Research concept [Akustychna model kvazistatsionarnykh tras. Chastyna 1. Kontseptsiiia doslidzhen]. *Hydroacoustic journal (Problems, methods and means of research of the World Ocean): Collection of scientific works*, 6, 10–23. Zaporizhzhia: STC PAS NAS of Ukraine [in Ukrainian].
12. Zamarenova, L.N., Skipa, M.I. (2010). Acoustic model of quasi-stationary paths. Part 2. Assessment of the physical adequacy of the acoustic model [Akustychna model kvazistatsionarnykh tras. Chastyna 2. Otsinka fizychnoi adekvatnosti akustychnoi modeli.]. *Hydroacoustic*

- Journal (Problems, methods and means of research of the World Ocean): Collection of scientific works*, 7, 58–72. Zaporizhzhia: STC PAS NAS of Ukraine [in Ukrainian].
13. Burenkov, S., Dubrovsky, N., Sabinin, K. (1992). Acoustic monitoring of the Black Sea. Problems of the Black Sea. International Conference. Sebastopol. Ukraine. November 10–15. P. 101–110.
 14. Dyvizynyuk, M.M. (1998). Acoustic fields of the Black Sea [Akustychni polia Chornoho moria]. State Oceanarium. 352 p. [in Ukrainian].
 15. Bunkin, F.B., Kravtsov, Y.A., Omelchenko, N.N., Petnikov, V.G., Shmelev, A.Yu. (1987). Results of the study of the stability of sound signals on stationary acoustic paths [Rezultaty doslidzhennia stabilnosti zvukovykh syhnaliv na statsionarnykh akustychnykh trasakh]. Acoustic waves in the ocean. Nauka. P. 84–91 [in Ukrainian].
 16. Babi, V.I., Burlakova, I.B., Virovlyansky, A.L., Demikhovskiy, S.V., Kravtsov, Yu.A., Kukushkin, V.D., Petnikov, V.G., Rivelis, E.A., Slavinsky, M.M., Smirnov, N.M., Farfel, V.A., Shmelev, A.Yu. (1989). Stationary acoustic path Crimea-Caucasus . Acoustics of the ocean environment. Science. P. 75–79.
 17. Furduev, A.V. (n.d.) Acoustic monitoring of underwater environment variability (experimental verification of new methods). *Acoustic Journal*, 47 (3), 422–430.
 18. Belogortsev, A.S., Belov, A.I., Zhuravlev, V.A., Khokha, Yu.V. (2002). Acoustic models of shelf marine waters and the problem of their physical adequacy. Proceedings of the Nizhny acoustic scientific session. P. 64–67.
 19. Kucherenko, N.V., Kapochkin, B.B., Kapochkina, M.B. (2025). Applied aspects of the regularities of the process of absorption of acoustic wave energy in water [Prykladni aspekty zakonamirnosti protsesu pohlynannia enerhii akustychnykh khvyl u vodi]. *Water transport*, 2 (43), 20–30. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.02 [in Ukrainian].
 20. Ocean Acoustics/Underwater Acoustics. URL: <http://www.tsuchiya2.org/> (accessed 02.07.2025).
 21. Fisher, F.H., Simmons, V.P. (1977). Sound absorption in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62, 558–564.
 22. Francois, R.E., Garrison, G.R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72 (3), 896–907.
 23. Francois, R.E., Garrison, G.R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72 (6), 1879–1890.
 24. Bogushevich, B.K., Zamarenova, L.M., Skipa, M.I. (2005). The structure of the sound field on the shelf of the northwestern part of the Black Sea [Struktura zvukovoho polia na shelfi pivnichno-zakhidnoi chastyny Chornoho moria]. The experiment Consonance-2005. P. 182–188 [in Ukrainian].

25. Gladkikh, I.I., Kanaliuk, O.V., Kapochkin, B.B. (2018). The influence of sound refraction in the Azov-Black Sea region on the efficiency of target search by all-round survey sonars [Vplyv refraktsii zvuku v Azovo-Chornomorskomu raioni na efektyvnist poshuku tsilei hidrolokatoramy kruhovoho ohliadu]. *ScienceRise*, 2, 14–18 [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025