

## ВІЙСЬКОВІ НАУКИ

УДК 534:681.88

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.123276

**ВПЛИВ РЕФРАКЦІЇ ЗВУКУ В АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКОМУ РАЙОНІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОШУКУ ЦІЛЕЙ ГІДРОЛОКАТОРАМИ КРУГОВОГО ОГЛЯДУ**© **І. І. Гладких, О. В. Каналюк, Б. Б. Капочкін**

*Розглядаються питання просторово-часової мінливості негативного впливу природних перешкод на ефективність висвітлення підводної обстановки гідроакустичними методами. На прикладі Азово-Чорноморського регіону, узагальнені результати розрахунків рефракції та поглинання звуку в морській воді. За результатами розрахунків отримано типові для кожного місяця траєкторії акустичних променів та визначено періодичності формування зон гідроакустичної тіні*

**Ключові слова:** *променева гідроакустика, рефракція, поглинання звуку, вертикальний розподіл швидкості звуку, гідролокатор кругового огляду*

**1. Вступ**

Акустичне поле в будь-якій точці океану формується в результаті впливу на процес поширення звукових хвиль поглинання, рефракції, інтерференції, дифракції, відбиття і розсіювання. Для вирішення завдань, що стосуються поширення звуку в морській воді, важливо не абсолютне значення швидкості, а залежність швидкості звуку від глибини. При різних типах вертикального розподілу швидкості звуку виникають гідроакустичні явища, що роблять сприятливий, або несприятливий вплив на дальність його поширення. В роботі розглядаються проблеми пошуку цілей гідроакустичними методами за умов виникнення ефекту викривлення фронту акустичної хвилі.

Актуальність дослідження полягає в тому, що ефект рефракції погіршує роботу гідроакустичних приладів, у тому числі гідролокаторів кругового огляду. Визначення просторового положення зон гідроакустичної тіні дозволяє зменшити негативний вплив рефракції на ефективність гідроакустичного обладнання.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що за рахунок визначення просторового положення зон гідроакустичної тіні, виникають технічні можливості зберегти високу ефективність системи моніторингу підводної обстановки акустичними методами.

**2. Літературний огляд**

Найбільш проблемним місцем у гідроакустиці є невизначеність просторово-часової мінливості властивостей середовища, в якій поширюється акустичний сигнал. В результаті цього, напрямком отримання

сигналу, відбитого ціллю може не відповідати реальному напрямку на ціль, а обчислена відстань до цілі може бути істотно коротшою фактичної. Крім цього, умови поширення акустичного сигналу можуть характеризуватися існуванням зон гідроакустичної “тіні”, які перешкоджають безперервному супроводженню цілі акустичними методами.

Для механічних (акустичних) хвиль зміна фазової швидкості призводить до зміни усіх характеристик хвилі, за винятком частоти. Зміна фазової швидкості в реальному об'ємі океану призводить до викривлення фронту хвилі – рефракції. У зв'язку з рефракцією, траєкторія поширення акустичного променя криволінійна. Тому затримка у часі відбитого сигналу характеризує не відстань до об'єкту локації, а довжину шляху, яку пройшов акустичний сигнал. Так як швидкість поширення звуку уздовж нелінійного акустичного променя є змінною величиною, то для визначення просторового положення об'єкту локації необхідно знати, окрім затримки у часі приймання відбитого сигналу, траєкторію поширення звукового променя та функцію зміни швидкості хвилі уздовж нього.

Важливим є ефект затухання звуку у морській воді, що впливає на дальність виявлення цілей. Для вирішення практичних завдань ввели поняття коефіцієнту затухання, що характеризує сумарне ослаблення швидкості звуку [1]. Фізичні механізми поглинання звуку в морській воді можна умовно розділити на три типи:

- поглинання, пов'язане з в'язкістю морської води;
- поглинання звуку в результаті релаксаційних явищ внаслідок перебудови молекулярної структури;

– релаксаційні процеси, обумовлені дисоціацією молекул.

Питання виникнення рефракції та поглинання акустичних хвиль в шельфових районах розглянуті в роботі [2], а у шельфовій зоні Чорного моря в роботах [3–7]. У роботі [3] розглядаються військові аспекти застосування гідроакустичного методу пошуку цілей в Чорноморському регіоні. У роботі [4] розглянуті питання визначення природних акустичних перешкод в Чорному морі, шляхом розрахунків траєкторії розповсюдження акустичних хвиль. В роботі [5] запропоновано акустичну модель квазістаціонарних трас у Чорному морі. За результатами теоретичного моделювання рефракції акустичних хвиль та вимірювань [6], показано, що на шельфі Чорного моря в умовах позитивної рефракції акустичний сигнал долає відстань 7 км і більше, а в умовах негативної рефракції не більше 2,5 км. В роботі [7] розглянуто питання дальнього розповсюдження звуку в Чорному морі. Сезонні зміни ефекту рефракції акустичних хвиль у Азово-чорноморському районі не досліджувалися.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення впливу рефракції на ефективність пошуку цілей гідролокаторами кругового огляду в Азово-Чорноморському районі.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- розрахувати сезонні характеристики рефракції акустичних хвиль;
- визначити системні зміни просторового положення зон гідроакустичної «тіні».

### 4. Розрахунки поглинання та рефракції звуку в Азово-Чорноморському районі

При створенні гідроакустичного програмного забезпечення за основу було обрано програмний комплекс «A MATLAB GUI InterfacePackage for Long-Range AcousticCalculations», розроблений на основі променевої гідроакустичної моделі BELLHOP версії 2010 р. в лабораторії прикладної фізики Вашингтонського університету (автор Brian Dushaw). Модель BELLHOP була розроблена у Naval Ocean Systems Center. Програмне забезпечення може використовуватися для розрахунків траєкторії розповсюдження акустичних променів та втрат енергії акустичного сигналу під час його розповсюдження. Реалізовано режим розрахунків з використанням глобальних кліматичних даних про швидкість звуку (за даними NOAA WorldOceanDatabase 2009) та глобальних батиметричних даних (дані Каліфорнійського університету за 2014р.). Реалізована можливість розрахунків траєкторії розповсюдження акустичних променів, а також втрат енергії акустичного сигналу під час розповсюдження в певних акваторіях. Зазначена модель була верифікована на даних експериментальних досліджень відділення гідроакустики МГІ НАНУ [8].

Поглинання та втрата передачі акустичного сигналу у морській воді розраховувалися за моделлю [9]. Авторами моделі наведено інформацію про результати оцінки поглинання та втрати передачі у

морській воді для різних регіонів. Наявність даних розрахунків по Балтійському морю, якісні характеристики води якого збігаються з характеристиками води Чорного моря, дає підстави для застосування зазначеної моделі в Азово-Чорноморському районі. Розрахунки були виконані для чотирьох зон Азово-Чорноморського району. Найбільша увага приділялася розрахункам для глибин найбільш імовірного генерування звуку від надводних та підводних цілей в шельфовій зоні [10]. З метою дослідження особливостей просторового розподілу зон низької щільності акустичних променів, результати розрахунку втрат акустичної енергії були оброблені методами спектрального аналізу та виконана процедура вузької смугової фільтрації просторових рядів втрат акустичної енергії.

### 5. Аналіз результатів розрахунків впливу рефракції акустичних хвиль на ефективність пошуку цілей гідролокатором кругового огляду

В результаті аналізу виконаних розрахунків поглинання та коефіцієнта втрат передачі, розрахованих для умов сферичного поширення сигналу на 1 км для акустичного сигналу з частотою 60 кГц визначено, що в шельфовій зоні Чорного моря на дистанції 1 км потужність звуку зменшується в 6,6–10,5 раз; коефіцієнт втрат передачі знаходиться в межах 68,2–70,2, а в Азовському морі на дистанції 1 км потужність звуку зменшується в 3,5–5,2 разів, коефіцієнт втрат передачі знаходиться в межах 65,5–67,1.

За результатами розрахунків, виконаних для частоти 7 кГц, для умов циліндричного розповсюдження акустичного сигналу визначено, що в шельфовій зоні Чорного моря на дистанції 1 км потужність звуку зменшується лише в 1,06–1,09 разів, коефіцієнт втрат передачі знаходиться в межах 42,4–43,6, а в Азовському морі на дистанції 1 км потужність звуку зменшується в 1,04–1,06 разів, коефіцієнт втрат передачі знаходиться в межах 41,8–42,7.

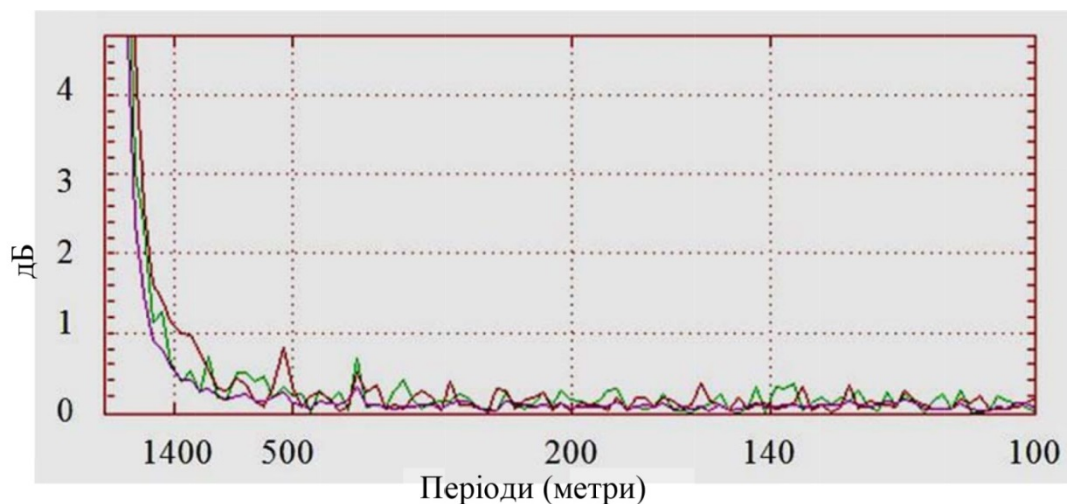
В Азово-Чорноморському регіоні поглинання гідроакустичної енергії гідролокаторами кругового огляду, які використовують ультразвукові частоти (розрахункова частота 60 кГц), на порядок перевищують поглинання акустичної енергії на звукових частотах (розрахункова частота 7 кГц). В Азовському морі поглинання акустичної енергії значно менше ніж у Чорному.

В результаті аналізу розрахунків втрат енергії акустичного сигналу методами спектрального аналізу, шляхом розрахунку амплітудних спектрів та кроспектрів, очікувалось визначення наявності системної складової просторових змін зон низької щільності акустичних променів. Для умов вертикального розподілу швидкості звуку в межах 4-х зон Азово-Чорноморського району були розраховані амплітудні спектри та кроспектри. В результаті аналізу даних отриманих розрахунків визначено три типи спектральних оцінок системної складової просторових змін втрат акустичної енергії, тобто зон низької щільності акустичних променів (рис. 1).

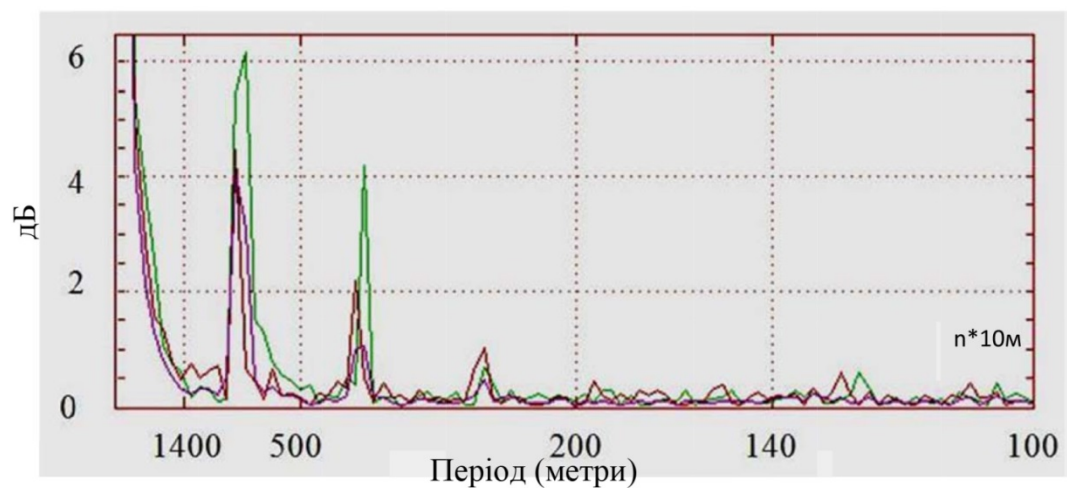
В результаті виконання досліджень з типізації розрахованих амплітудних спектрів та кроспектрів просторових змін втрат акустичної енергії встанов-

лено, що існують аперіодичні просторові зміни втрат акустичної енергії (рис. 1, *а*), просторові зміни втрат акустичної енергії з декількома просторовими циклами (рис. 1, *б*), просторові зміни втрат акустичної енергії з одним циклом (рис. 1, *в*). Для типового ви-

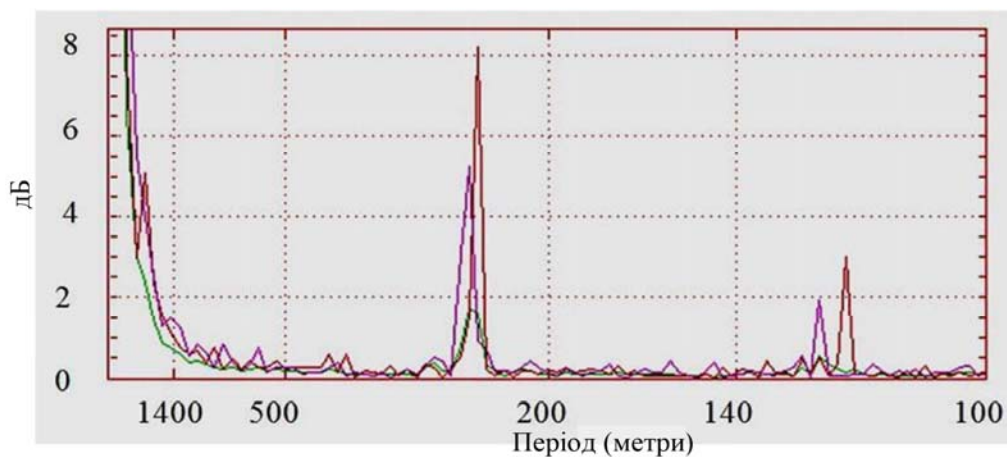
падку просторових змін втрат акустичної енергії з одним циклом, на рис. 2 показано результати вузько-смугової фільтрації. Зони втрат акустичної енергії, так звані зони акустичної «тіні», показані як від'ємні значення.



*а*



*б*



*в*

Рис. 1. Результат типізації амплітудних спектрів та кроспектрів просторових змін втрат акустичної енергії: *а* – аперіодичні просторові зміни втрат акустичної енергії; *б* – просторові зміни втрат акустичної енергії з декількома циклами; *в* – просторові зміни втрат акустичної енергії з одним циклом

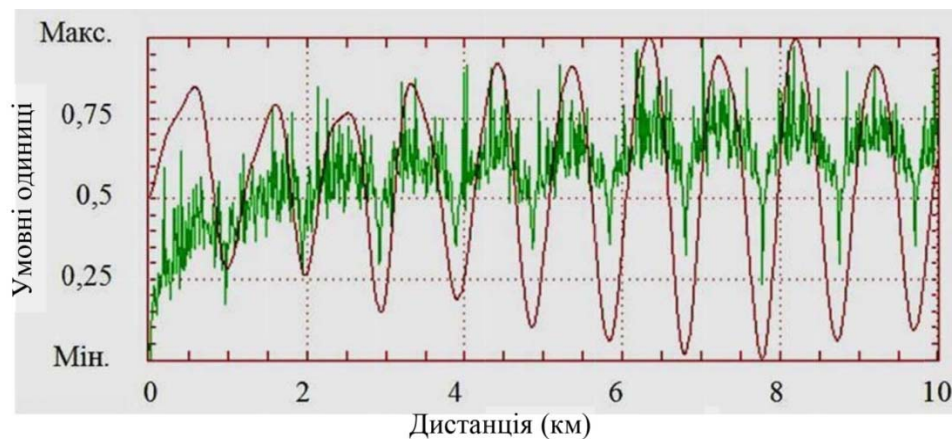


Рис. 2. Приклад результатів застосування вузькосмугової фільтрації (сірий) до просторових змін втрат акустичної енергії (темний)

Показано, що при циклічному повторенні у просторі зон низької щільності акустичних променів (один цикл дорівнює 1000 м), зони так званої акустичної «тіні» мають ширину до 150 м та циклічно повторюються кожні 1000 м. Нами встановлено що в Азово-Чорноморському районі протягом року просторове положення зон акустичної «тіні» може проявлятися періодично у просторі.

В амплітудних спектрах рядів просторової мінливості втрат акустичної енергії можливо виді-

лення головної гармоніки, що дозволяє розраховувати циклічність повторюваності у просторі зон акустичної тіні. За результатами розрахунків для кожного місяця року визначено головні гармоніки просторових змін втрат акустичної енергії для 4-х розрахункових зон Азово-Чорноморського району, та побудовано графіки їх внутрішньорічних змін (рис. 3). Місяці з аперіодичним характером просторових змін втрат акустичної енергії позначені як 100 м.

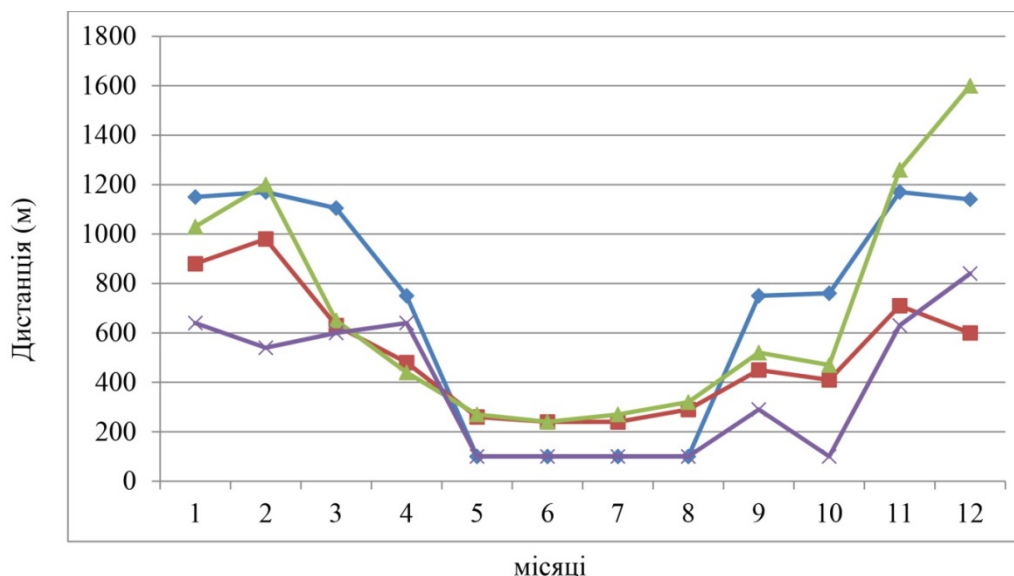


Рис. 3. Результати розрахунків внутрішньорічних змін просторових розмірів головних циклів втрат акустичної енергії для 4-х зон Азово-Чорноморського району

Згідно рис. 3 можна відзначити, що для Азово-Чорноморського району характерна річна мода просторової мінливості ширини зон акустичної тіні. В районі досліджень ширина зони низької щільності акустичної енергії максимальна взимку і мінімальна влітку.

Аперіодичні умови рефракції акустичних хвиль можуть виникати в теплий сезон. Враховуючи те, що річна мода є домінуючою, стає реальним розробка практичних рекомендацій зі зменшення негативного впливу рефракції на моніторинг підводної обстановки з застосуванням гідролокаторів кругового огляду.

## 6. Висновки

В результаті досліджень в Азово-Чорноморському районі узагальнені результати розрахунків рефракції та поглинання звуку в морській воді. Для звукових та ультразвукових частот отримано типові для кожного місяця траєкторії розповсюдження акустичних променів від джерела випромінювання звуку та визначено закономірності формування зон гідроакустичної «тіні».

1. Вперше, шляхом застосування спектрального аналізу результатів розрахунку просторових втрат акустичної енергії, встановлено наявність чітких

просторових циклів прояву зон низької щільності акустичного сигналу.

2. Результати розрахунку кроспектрів просторових втрат акустичної енергії по суміжних місяцях вперше підтвердили існування спадкоємності змін у

часі розрахованих гармонік просторових змін положення зон акустичної тіні.

3. Для різних районів Азово-Чорноморського регіону особливості внутрішньорічних змін прояву ефекту рефракції акустичних хвиль мають загальний характер.

#### Література

1. Лисютин В. А. Вертикальное распределение скорости звука в океане. URL: [https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00082082\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00082082_0.html)
2. Акустические модели шельфовых морских акваторий и проблема их физической адекватности / Белогорцев А. С. и др. // Труды Нижегородской акустической научной сессии, ННГУ. 2002. С. 64–67.
3. Дивизинюк М. М. Акустические поля Черного моря. Севастополь: Госокеанариум, 1998. 352 с.
4. Богусевич В. К., Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Повышение эффективности экологического и ресурсного мониторинга морской среды за счёт применения метода акустического горизонтального лучевого зондирования: сб. тр. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. № 14. С. 349–357.
5. Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 1. Концепция исследований // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). 2009. № 6. С. 10–23.
6. Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 2. Концепция исследований // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). 2010. № 7. С. 58–72.
7. Богусевич В. К., Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Дальнее распространение звука в приповерхностном подводном звуковом канале северо-западной части Черного моря // Консонанс-2005. Киев, 2005. С. 84–89.
8. Зорін В. Ю., Єшану О. С., Капочкін Б. Б. Верифікація гідроакустичного програмного забезпечення в Чорноморському регіоні // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи. Одеса, 2017. С. 141–142.
9. Ainslie M. A., McColm J. G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water // The Journal of the Acoustical Society of America. 1998. Vol. 103, Issue 3. P. 1671–1672. doi: 10.1121/1.421258
10. Перспективы технологий, использующих гидроакустические методы, для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ / И. И. Гладких и др. // Первый независимый научный вестник: технические науки. 2015. Т. 2000, № 2. С. 60–66.

*Дата надходження рукопису 04.01.2018*

**Гладких Ігор Іванович**, доктор технічних наук, професор, кафедра гідрографії та морської геодезії, Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029  
E-mail: gladkykh@ukr.net

**Каналюк Олексій Володимирович**, начальник відділу, Воєнно-науковий відділ, Військова частина А0456 МО України, пров. Штабний, 1, м. Одеса, Україна, 65009

**Капочкін Борис Борисович**, кандидат геолого-мінералогічних наук, провідний науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», вул. Епронівська, 7, м. Одеса, Україна, 99024  
E-mail: tsb1@ukr.net