

УДК 551.463.22

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ ЗА ТЕМПЕРАТУРОЮ ВОДИ НА ПРИКЛАДІ ЧОРНОГО МОРЯ

О. Р. Андріанова, А. В. Сриберко

ДУ «Відділення гідроакустики Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України»,
вул. Преображенська, 3, 65082, Одеса, Україна
olga_andr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6008-8812>
sriberko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7683-9628>

У статті представлені результати досліджень з розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку в діяльному шарі Чорного моря за температурою води. Дослідження проводилися в діяльному шарі глибоководної частини Чорного моря, на глибинах 0–50 метрів. Вихідними даними були спостережені на гідрологічних станціях значення температури води або дані суднових вимірів (OSD – Ocean Station Data) та дані, виміряні за допомогою поплавців (PFL - Profiling float data). Розрахунки ґрунтувалися на визначенні кореляційних зв'язків між значеннями температури води на стандартних горизонтах в Чорному морі за даними OSD та швидкістю звуку, розрахованої за рівнянням ЮНЕСКО. Оцінка точності розрахунку проводилася методом порівняння значень швидкості звуку, що розраховані за визначеними рівняннями регресії та за рівнянням ЮНЕСКО, на основі PFL даних.

Визначені рівняння регресії для розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі до глибини 50 метрів в період весна – осінь. Проведена оцінка можливості розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку за розробленими рівняннями.

Розрахунки показали статистично значущі результати в період весна – осінь. Множинні коефіцієнти кореляції значущі та склали 0,99. Розроблені рівняння регресії ефективні й надійні. Перевірка ефективності та надійності рівнянь регресії показала, що стандартна помилка була в межах $\pm 1 \text{ м с}^{-1}$.

Для візуалізації результатів, розрахунок вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі за рівняннями регресії проводився по 6 гідрологічних розрізах (по 1 розрізу для кожного місяця), виконаних в 2018 році. Показано, що ізолінії вертикального розподілу швидкості звуку, які розраховані за рівняннями регресії та рівнянням ЮНЕСКО практично когерентні.

Визначені рівняння можуть бути використані для розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку до глибини 50 метрів в Чорному морі в період травень – жовтень за даними вимірювань або моделювання мінливості температури води. Даний розрахунок можна застосовувати в наукових-дослідних та прикладних цілях в галузі гідрографії, гідроакустики, океанології, екології моря, судноплавств та ін.

Ключові слова: Чорне море; розрахунок швидкості звуку; температура води; кореляційний зв'язок; рівняння регресії.

1. ВСТУП

Поширення звукових коливань в морській воді є складним явищем, залежним від розподілу температури (T) та солоності (S), зміни гідростатичного тиску (P), глибини моря (z) й характеру ґрунту, стану поверхні моря, замутненості води завислими домішками органічного і неорганічного походження та наявності розчинених газів.

Морська вода є середовищем акустично неоднорідним. Ця неоднорідність полягає, передусім, в зміні щільності з глибиною, внаслідок чого змінюється з глибиною і швидкість звуку

(C), а поширення звукових коливань відбувається не по прямих, а по більш складних траєкторіях. Наявність в морській воді бульбашок газу, зважених частинок та планктону викликає розсіювання і поглинання звукової енергії при її поширенні [1].

Величина швидкості звуку може бути визначена шляхом безпосередніх вимірів за допомогою спеціальних складних та дорогих прецизійних приладів – швидкостемірів або обчисленням за емпіричними формулами [2, 3].

При масових розрахунках швидкості звуку доводиться вирішувати проблему вибору розра-

хункової формули, оскільки нині в цьому питанні не існує загальноприйнятого стандарту, а розрахунки за різними формулами, яких відомо більше десяти, приводять, строго кажучи, до результатів, що різняться між собою [4].

На сьогодні існує велика проблема отримання контактних даних вертикального розподілу термохалінних характеристик Чорного моря, на основі яких проводяться розрахунки значень швидкості звуку. Тому, доводиться прибгати до непрямих визначень вертикального розподілу гідрофізичних характеристик, тобто шляхом розробки різних методик розрахунку вертикального розподілу цих характеристик. У випадку відсутності цих контактних вимірів, використовуються прогностичні (змодельовані) значення термохалінних характеристик.

Розрахунок вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі є актуальною задачею, вирішення якої, дає оперативну можливість розраховувати вертикальний розподіл швидкості звуку як локально, так і по усій акваторії Чорного моря, в науково-дослідницьких та прикладних цілях в області гідрографії, гідроакустиці, океанології, екології моря, судноплавстві та ін.

Для поширення звуку в океані більш важливим є не абсолютне значення швидкості звуку, а залежність її від глибини – профіль швидкості звуку $C(z)$, тобто положення екстремумів, співвідношення між значеннями швидкості звуку у дна, поверхні та в екстремальних точках, розподіл градієнтів швидкості звуку по глибині й так далі. Профіль $C(z)$, по суті, визначає умови поширення звуку в океані. При одному типі $C(z)$ дальність поширення звуку може досягати сотень й тисяч кілометрів, а при іншому – лише декількох кілометрів [2, 3, 5].

Великомасштабна вертикальна структура вод глибокого моря, що визначає вид профілю швидкості звуку, має декілька характерних ділянок різної протяжності. Безпосередньо у поверхні розташований шар, схильний до прямої дії усіх метеофакторів. Під приповерхневим шаром знаходиться сезонний термоклин, або шар температурного стрибка, в якому температура різко зменшується з глибиною. Влітку та восени, в тиху погоду, сезонний термоклин стійкий й має чіткі межі. Взимку і весною він зливається з поверхневим шаром та виділити його неможливо. Під сезонним знаходиться протяжний по глибині основний термоклин, схильний до незначних сезонних змін. У основному термокліні спостерігається найбільша зміна температури води у часі і просторі. Нижче основного термокліну до дна тягнеться глибоководний ізотермічний шар,

що має майже постійну температуру.

У основу класифікації профілів $C(z)$ покладена кількість та вид акустичних хвильоводів, обумовлених великомасштабною вертикальною термохалінною структурою вод.

В океанології прийнято звукові канали підрозділяти за розташуванням та масштабами на приповерхневі та підводні (глибинні), енергетично за здатністю до концентрації акустичної енергії – на «сильні», з великим вертикальним градієнтом швидкості та «слабкі» - з відносно малим градієнтом. Фізична класифікація відповідає чиннику середовища, що викликає формування каналу.

Глибина, що відповідає мінімальному значенню швидкості звуку, називається віссю підводного звукового каналу. Сила акустичного хвильоводу кількісно характеризується критичним (максимальним) кутом виходу звукових променів з точкового джерела, які захоплюються каналом [2].

Приповерхневі звукові канали фізично класифікують за причиною виникнення на гідростатичні, термічні, халінні та синоптичні. Ширина приповерхневого звукового каналу – це відстань від поверхні океану до глибини підповерхневого максимуму швидкості звуку.

Найбільш інтенсивна рефракція звукових променів відбувається в шарі стрибка швидкості звуку, який співпадає з шаром стрибка щільності води. Враховуючи, що зміни щільності води найчастіше визначаються змінами температури, а не солоності, шар стрибка швидкості звуку зазвичай пов'язаний з шаром стрибка температури. Під час переходу звукових променів через шар стрибка, інтенсивність звуку різко зменшується [1, 6].

На сьогодні, підводний звуковий канал (ПЗК) в Чорному морі досить добре вивчений [2, 7, 8, 9, 10]. Також в роботі [11] висвітлені й більш ранні дослідження поширення швидкості звуку в ПЗК Чорного моря.

У роботі [4] описані дослідження з розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі, в шарі від 150 м і до дна, де зміна швидкості звуку залежить тільки від глибини ($C = f(Z)$).

Розрахунок вертикального розподілу швидкості звуку в діяльному шарі Чорного моря, де на зміни швидкості звуку впливають сезонні коливання термохалінних характеристик, також має дуже важливе значення. Наприклад, в практиці судноводіння знання можливо більш точного значення швидкості звуку, як в приповерхнево-му шарі, так і, в особливості, вертикального роз-

поділу швидкості звуку по глибині, виявляється критично важливим для вирішення задачі визначення місця судна в мілководних районах морів шляхом звірення ехолотних вимірів з морською картою [3].

Мета досліджень. Температура води є найрегулярніше вимірюваним, прогнозованим й модельованим (гідродинамічні та фізико-статистичні моделі [12, 13]) параметром, в порівнянні з іншими гідрологічними характеристиками. Мета досліджень, описаних в цій статті, полягала у визначенні можливості розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку в діяльному шарі Чорного моря за значеннями температури води.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Верхній 50-ти метровий шар в Чорному морі відрізняється високою сезонною мінливістю температури води [4]. Також, найбільше на швидкість звуку, в цьому шарі, впливає зміна температури морської води й тому ми можемо уявити залежність швидкості звуку як функцію температури: $C = f(T)$.

Для апроксимації кривої $C(z)$, були визначені кореляційні зв'язки між температурою води і швидкістю звуку та побудовані рівняння регресії.

Визначення залежностей, для побудови статистичних рівнянь, між значеннями температури води, глибини та швидкістю звуку в Чорному морі проводилися для глибоководної частини моря на стандартних горизонтах (0, 10, 20, 25, 30, 50 метрів) в період весна – осінь. Цей район досліджень представлений найбільшою кількістю вимірів й входить в зону Основної Чорноморської течії.

Для визначення кореляційного зв'язку між значеннями температури води, глибини та швидкістю звуку в Чорному морі, а також для побудови рівнянь регресії, як вихідні, використовувались дані вимірювань значень температури води, солоності та глибини на гідрологічних станціях або дані суднових вимірів (OSD - Ocean Station Data) з 1890 по 2005 рр. [21]. Швидкість звуку розраховувалася за рівнянням ЮНЕСКО [3, 14]

$$C(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(T, P)S^2, \quad (1)$$

де C – швидкість звуку; C_w, A, B, D – коефіцієнти рівняння; S – солоність води; T – температура води; P – гідростатичний тиск.

Коефіцієнти C_w, A, B, D розраховуються за окремими формулами [14]. Рівняння дозволяє розраховувати швидкість звуку залежно від температури, солоності та гідростатичного тиску із стандартною помилкою $0,19 \text{ м с}^{-1}$. Рівняння можна застосовувати для таких діапазонів мінливості його змінних: $0^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$, $0 \text{ дБар} < P < 1000 \text{ дБар}$, $0\text{‰} < S < 40\text{‰}$.

Через великий обсяг даних (більше 123400 вимірів) акваторія Чорного моря була поділена на 3 частини (рис. 1):

1. Західна частина Чорного моря з координатами: по довготі від $27,460^\circ\text{сх.д.}$ до $32,500^\circ\text{сх.д.}$, по широті – від $41,090^\circ\text{пн.ш.}$ до $45,000^\circ\text{пн.ш.}$

2. Центральна частина Чорного моря з координатами: по довготі від $32,500^\circ\text{сх.д.}$ до $36,500^\circ\text{сх.д.}$, по широті – від $41,250^\circ\text{пн.ш.}$ до $45,000^\circ\text{пн.ш.}$

3. Східна частина Чорного моря з координатами: по довготі від $36,500^\circ\text{сх.д.}$ до $41,765^\circ\text{сх.д.}$, по широті – від $40,930^\circ\text{пн.ш.}$ до $45,000^\circ\text{пн.ш.}$

Визначення кореляційних зв'язків між значеннями температури води, глибини та швидкістю звуку, що розрахована за рівнянням ЮНЕСКО в Чорному морі, та побудова рівнянь лінійної регресії проводилися окремо для кожної частини Чорного моря.



Рис. 1 – Карта частин Чорного моря, для яких виконувались дослідження

Мірою лінійної кореляційної залежності між значеннями швидкості звуку, розрахованої за рівнянням ЮНЕСКО (1), фактичною (виміряною) температурою води й глибиною характеризував безрозмірний множинний коефіцієнт кореляції $0 \leq R \leq 1$ [15, 16, 17, 18]. Перевірка значущості R проводилася методом порівняння коефіцієнтів кореляції (R) з критичним значенням коефіцієнтів множинної кореляції $R(\alpha)$ при рівні достовірності $\alpha = 0,95$.

Критичне значення коефіцієнтів множинної кореляції $R(\alpha)$ можна розрахувати за рівнянням

$$R(\alpha) = \sqrt{\frac{(k-1)F_{\alpha}(f_1, f_2)}{n-k+(k-1)F_{\alpha}(f_1, f_2)}}, \quad (2)$$

де $F_{\alpha}(f_1, f_2) - F$ - критерій Фішера з $f_1 = k - 1$ і $f_2 = n - k$ ступенями свободи при рівні достовірності α ; n - число членів ряду; k - число змінних в рівнянні регресії.

Також $R(\alpha)$ можна визначити за таблицями [17]. Якщо $R \geq R(\alpha)$, то відповідна кореляція визнається значимою [17, 18].

Ще одним критерієм значущості R послужило відношення R/E_R . При надійній залежності множинний коефіцієнт кореляції (R) в 6 - 10 разів більше своєї імовірнісної помилки E_R [15].

Оцінка значущості та надійності лінійних рівнянь регресії проводилася по F -критерію Фішера при рівні достовірності $\alpha = 0,95$.

Якщо розрахункове значення $F > F_{\alpha}(f_1, f_2)$ (критичне), то признається статистична значущість та надійність рівняння регресії [17, 18].

Також, оцінка точності розрахунків визначається ефективністю методу, що використовується. Одним з критеріїв точності розрахунків та можливості застосування їх на практиці служить відношення S/σ , де S - середньоквадратична помилка розрахунків, σ - середньоквадратичне відхилення значень фактичних вимірів. Величини S , σ можна обчислити за відомими формулами [15, 16, 17, 18, 19, 20].

Чим менше відношення S/σ , тим надійніше метод розрахунків. За наявності функціональної залежності $S/\sigma = 0$, а при $S/\sigma = 1$ варіація функції не залежить від варіації аргументу і, отже, зв'язок між змінними відсутній [15, 16]. Для розрахунків вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі допустимою помилкою є: $S/\sigma \leq 0,67$ при $n > 25$, де n - кількість вимірів.

Для перевірки ефективності та точності розрахунків за критерієм S/σ , значення швидкості

звуку в Чорному морі, які розраховані за побудованими рівняннями регресії, порівнювалися зі значеннями швидкості звуку, розрахованими за рівняннями ЮНЕСКО. Як вихідні дані використовувались значення температури води, солоності та глибини, виміряні на стандартних горизонтах (0, 10, 20, 25, 30, 50 метрів) за допомогою поплавців (PFL - Profiling float data) з 2005 по 2017 рр. [21].

Розрахунок вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі на вищевказаних стандартних горизонтах проводився за побудованими рівняннями множинної регресії, які мають вигляд

$$C = aT + bz + d, \quad (3)$$

де a, b, d - коефіцієнти рівняння множинної регресії; C - швидкість звуку (м с^{-1}); T - значення температури води ($^{\circ}\text{C}$); z - глибина моря (м).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати розрахунків показали досить високий кореляційний зв'язок між температурою води, глибиною та швидкістю звуку в усіх частинах Чорного моря в період весна - осінь. Множинні коефіцієнти кореляції (R) дорівнювали 0,99 та перевищували критичне значення $R(\alpha)$ (табл. 1).

Імовірнісні помилки (E_R) були в межах $1,92 \times 10^{-5} - 5,35 \times 10^{-5}$, а відношення R/E_R - більшим за 18538, що свідчить про значущість R та надійність кореляційного зв'язку між температурою води, глибиною та швидкістю звуку в усіх частинах Чорного моря в період весна - осінь (табл. 1).

Розрахункові значення F були в межах $1,3 \times 10^6 - 2,8 \times 10^6$ та перевищували критичне значення $F_{0,95} = 3$. Значення критерію (S/σ) склали 0,062 - 0,077, що менше критичного значення 0,67.

Таблиця 1 - Статистичні характеристики розрахунків і побудовані рівняння множинної регресії для Чорного моря в період весна - осінь

Частини Чорного моря	R	$R(0,95)$	R/E_R	F	$F_{0,95}$	Рівняння регресії
Західна	0,99	0,01	18538	1314264	3	$y = 3.295x + 0.028z + 1435.904$
Центральна	0,99	0,02	51957	2558485	3	$y = 3.240x - 0.011z + 1437.650$
Східна	0,99	0,01	44792	2830613	3	$y = 3.185x - 0.003z + 1437.896$

Це означає, що усі побудовані рівняння регресії ефективні, надійні, значимі, а показники тісноти зв'язку значимі та відображають стійку залежність між значеннями температури води, глибиною й швидкістю звуку в усіх частинах Чорного моря в період весна – осінь.

Результати перевірки ефективності й точності розрахунків, яка проводилася методом порівняння значень швидкості звуку в Чорному морі, розрахованих за побудованими рівняннями регресії (табл. 1), зі значеннями швидкості звуку, розрахованих за рівнянням ЮНЕСКО (1), показали, що стандартна помилка була в межах $\pm 1 \text{ м с}^{-1}$ (при $n = 13407$; $\sigma = 17$) в усіх частинах Чорного моря.

Для візуалізації, розрахунок вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі за рівняннями регресії проводився по 6-ти гідрологічних розрізах (по 1 розрізу для кожного місяця) виконаних в 2018 році. Станції вибиралися так, щоб розрізи були розподілені по всіх частинах глибоководної акваторії Чорного моря (рис. 2).

Результати розрахунків вертикального розподілу швидкості звуку за рівнянням ЮНЕСКО (1) та за рівняннями регресії (табл. 1) представлені на (рис. 3).

Рисунок 3 побудований за допомогою комп'ютерної програми ODV (Ocean Data View), призначеної для інтерактивного дослідження та графічного відображення океанографічних профілів, траєкторій або часових рядів даних [22].

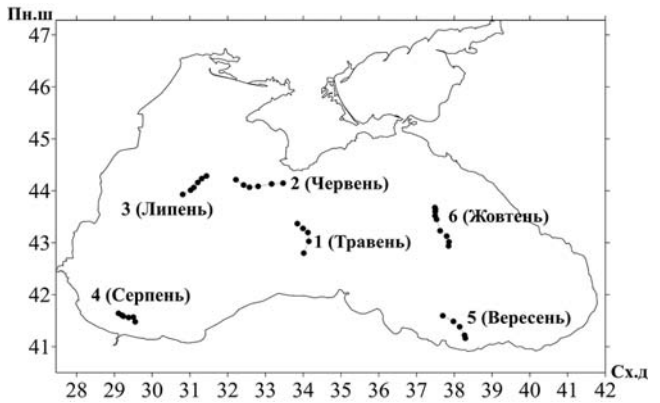


Рис. 2 – Схема розташування гідрологічних розрізів, використаних для аналізу та розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі в 2018 році. Позначення на карті означають номер розрізу та місяць року

З рисунка видно, що ізолінії вертикального розподілу швидкості звуку, розрахованого за рівняннями регресії та за рівняннями ЮНЕСКО практично когерентні.

Порівняння значень швидкості звуку на стандартних горизонтах, розрахованих за рівняннями регресії (табл. 1), зі значеннями швидкості звуку, розрахованими по рівнянню ЮНЕСКО (1), показало, що стандартна помилка склала $\pm 1 \text{ м с}^{-1}$ (при $n = 2043$; $\sigma = 18$), по усій глибоководній акваторії Чорного моря в 2018 році в період весна – осінь.

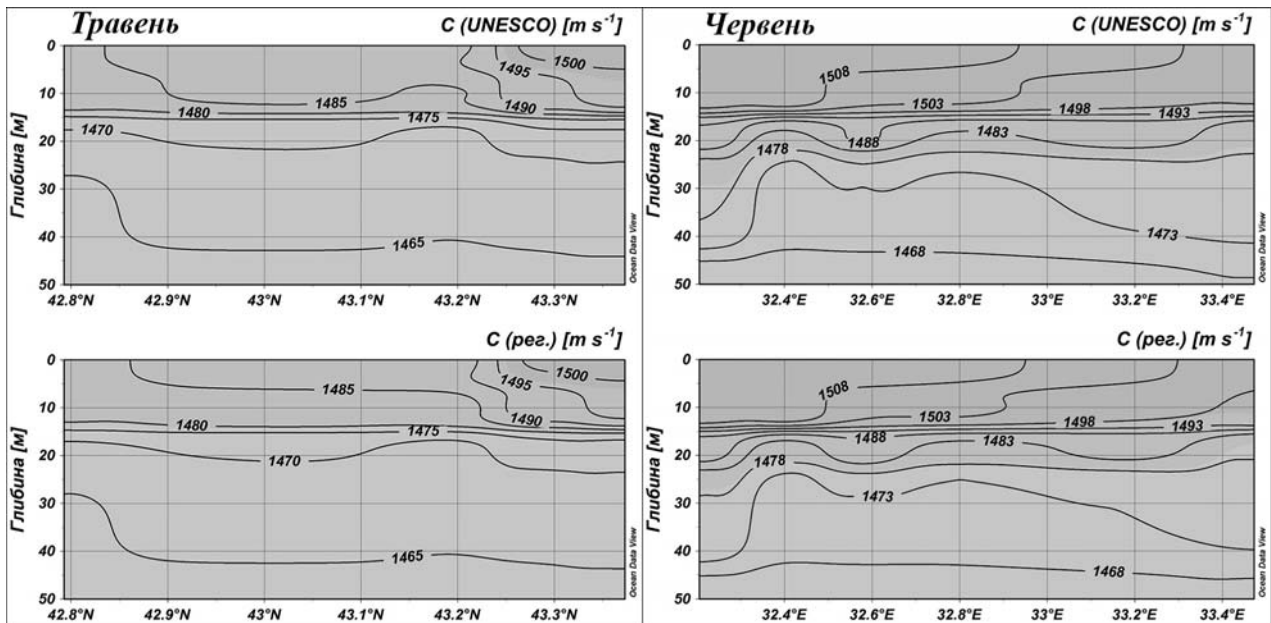


Рис. 3 – Вертикальний розподіл швидкості звуку на розрізах (рис.2), розрахований за рівнянням ЮНЕСКО – C (UNESCO) та рівняннями регресії – C (рег.)

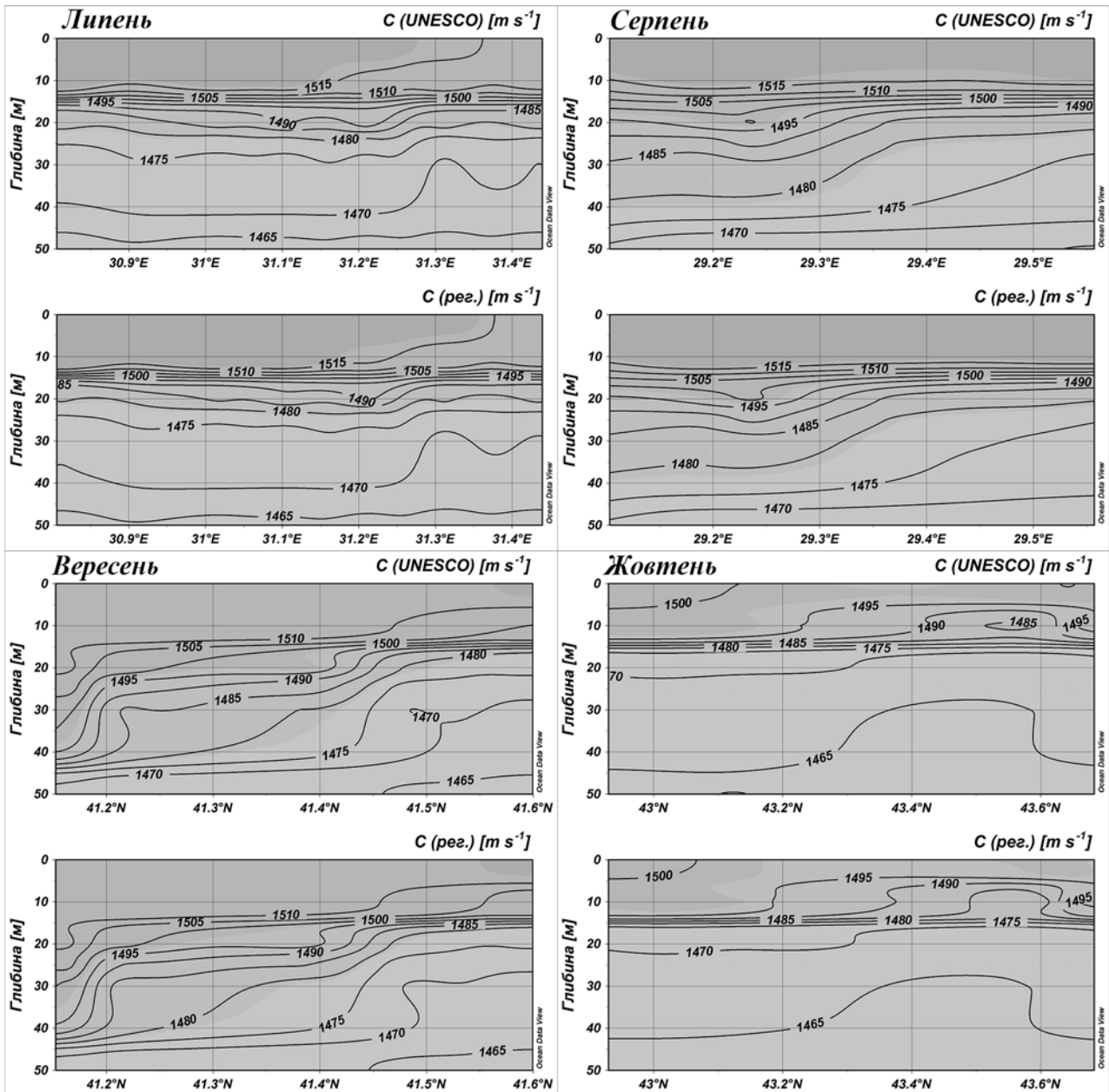


Рис. 3 – Закінчення

Наприкінці відзначимо, що на основі побудованих рівнянь регресії можна відтворити вертикальний розподіл швидкості звуку на стандартних горизонтах до глибини 50 метрів по усій глибоководній акваторії Чорного моря в період весна – осінь, підставляючи в рівняння регресії прогностичні (змодельовані) значення температури води.

4. ВИСНОВКИ

Виявлений високий кореляційний зв'язок між температурою води, глибиною та розрахованою швидкістю звуку за рівнянням ЮНЕСКО в Чор-

ному морі. Множинні коефіцієнти кореляції значимі та дорівнювали 0,99.

Розроблені рівняння регресії для розрахунку вертикального розподілу швидкості звуку надійні та ефективні. Стандартна помилка розрахунків вертикального розподілу швидкості звуку в глибоководній акваторії Чорного моря в період весна – осінь була в межах $\pm 1 \text{ м с}^{-1}$.

Розроблені рівняння можуть бути використані для розрахунку, прогнозу, тривимірного моделювання мінливості вертикального розподілу швидкості звуку на глибинах до 50 метрів в Чорному морі в період весна – осінь.

На нашу думку, цей розрахунок вертикального розподілу швидкості звуку в Чорному морі

можна застосовувати в науково-дослідницьких та прикладних цілях при вирішенні прикладних задач гідрографії, гідроакустики, океанології, екології моря, судноплавства та ін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Егоров Н. И. Физическая океанография. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 456 с.
- О влиянии профиля скорости звука и течений на распространение акустических волн в море / Ярошенко А. А. и др. *Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка*. 2007. № 1. С. 178-186.
- Ярошенко А. А. Вычисление скорости звука в морской воде. От Колладона и Штурма до наших дней. *Водний транспорт*. 2012. Вип. 3. С. 8-12.
- Архипкин В. С., Деев М. Г. Особенности поля скорости звука в Черном море. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2008. №6. С. 30-33.
- Магницкий В. А. Общая геофизика. Москва: МГУ, 1995. 317 с.
- Лисютин В. А., Ярошенко А. А. Вертикальное распределение скорости звука в океане. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. 2003. Т. 12. №58. С. 61-65.
- Вадов Р. А. Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия. *Акустический журнал*. 2007. Т. 53. №3. С. 313-328.
- Вадов Р. А. Поверхностная предреверберация при дальнем распространении взрывных сигналов в подводном звуковом канале. *Акустический журнал*. 2011. Т. 57. №2. С. 169-178.
- Вадов Р. А. Особенности формирования структуры звукового поля точечного источника в черноморском подводном звуковом канале. *Акустический журнал*. 2011. Т. 57. №5. С. 623-632.
- Лисютин В. А., Ластовенко О. Р., Ярошенко А. А. Сравнительная оценка вклада лучевых и волновых компонент при распространении импульсных сигналов в подводном звуковом канале Черного моря. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2018. №2. С. 74-85. <https://doi.org/10.31429/vestnik-15-2-74-85>
- 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.
- Оценка возможности расчета вертикального распределения температуры воды в Черном море по спутниковым данным / О. Р. Андрианова, М. И. Скипа, А. В. Сриберко и др. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2015. Т. 20. Вип. 4. С. 9-21.
- Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations / Miladinova S. et al. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. 122 (7). Pp. 5624-5644. <https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
- Fofonoff N. P., Millard Jr. R. C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Technical Papers in Marine Sciences. Paris, France, UNESCO, 1983. Vol. 44. 53 p. URL: <http://hdl.handle.net/11329/109> (Accessed 19 September 2019)
- Кудрявая К. И., Серяков Е. И., Скриптунова Л. И. Морские гидрологические прогнозы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 310 с.
- Морские прогнозы / З. К. Абузьяров, К. И. Кудрявая, Е. И. Серяков, Л. И. Скриптунова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 319 с.
- Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 816 с.
- Эконометрика: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. / И. И. Елисеева, С. В. Курышева, Т. В. Костеева и др.; под ред. И. И. Елисеевой. Москва: Финансы и статистика, 2007. 576 с.
- Hogg Robert V., Tanis Elliot A., Zimmerman D. Probability and Statistical Inference. 9th ed. Pearson Education, Inc., USA, 2015. 548 p.
- Ahn H. Probability and Statistics for Science and Engineering with Examples in R Second Edition. California, Cognella Inc. & University Readers, 2018. 361 p.
- NOAA World Ocean Database. URL: <http://www.nodc.noaa.gov> (дата звернення 27.05.2019).
- Schlitzer R. Ocean Data View. 2018. URL: <https://odv.awi.de> (дата звернення 19.09.2019).

REFERENCES

- Egorov, N.I. (1974). *Fizicheskaya okeanografiya. 2-e izd. dopolnennoe i pererabotannoe [Physical Oceanography. 2th ed.]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ).
- Yaroshenko, A.A. et al. (2007). O vliyaniy profilya skorosti zvuka i techeniy na rasprostranenie akusticheskikh voln v more [About the influence of velocity profile of sound and currents on the propagation of acoustic waves in the sea]. *Visnik SumDU. Seriya Fizika, matematika, mekhanika [J. Herald SumDU]*, 1, pp. 178-186. (in Russ)
- Yaroshenko, A.A. (2012). Vychislenie skorosti zvuka v morskoy vode. Ot Kolladona i Shturma do nashikh dney [The calculation of sound velocity is in the sea water. From Colladon and Sturm to our days]. *Vodnyy transport [Water Transport]*, 3, pp. 8-12. (in Russ)
- Arkhipkin, V.S., & Deev, M.G. (2008). Osobennosti polya skorosti zvuka v Chernom more [Characteristic features of the acoustic velocity field in the Black Sea]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]*, 6, pp. 30-33. (in Russ)
- Magnitsky, V.A. (1995). *Obshchaya geofizika [General geophysics]*. Moscow: MSU. (in Russ)
- Lisiutin, V.A., & Yaroshenko, A.A. (2003). Vertikal'noe raspredelenie skorosti zvuka v okeane [The vertical distribution of sound velocity in the ocean]. *Bulletin of Sumy State University. Technical Sciences Series*, 12(58), pp. 61-65. (in Russ)
- Vadov, R.A. (2007). Otkrytie podvodnogo zvukovogo kanala, eksperimental'nye issledovaniya, regional'nye razlichiya [The Discovery of the Underwater Sound Channel, the Experimental Studies, the Regional Differences]. *Akusticheskiy Zhurnal [Acoustic Journal]*, 53(3), pp. 313-328. (in Russ)
- Vadov, R.A. (2011). Poverkhnostnaya predreverberatsiya pri dal'nem rasprostraneniі vzryvnykh signalov v podvodnom zvukovom kanale [Surface Prereverberation in Long-Range Propagation of Explosion-Generated Signals in Underwater Sound Channel]. *Akusticheskiy Zhurnal [Acoustic Journal]*, 57(2), pp. 169-178. (in Russ)
- Vadov, R.A. (2011). Osobennosti formirovaniya struktury

- zvukovogo polya tochechnogo istochnika v chernomorskom podvodnom zvukovom kanale [Peculiarities in the Formation of the Sound Field Structure of a Point Source in the Black Sea Underwater Sound Channel]. *Akusticheskiy Zhurnal [Acoustic Journal]*, 57(5), pp. 623-632. (in Russ)
10. Lisiutin, V.A., Lastovenko, O.R., & Yaroshenko, A.A. (2018). Sravnitel'naya otsenka vklada luchevykh i volnovykh komponent pri rasprostraneniі impul'snykh signalov v podvodnom zvukovom kanale Chernogo morya [The comparative evaluation of the ray and wave components contribution to the impulse signals propagation of the Black Sea underwater sound channel]. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2, pp. 74-85 (in Russ). <https://doi.org/10.31429/vestnik-15-2-74-85>
 11. Zamarenova, L.N., & Skipa, M.I. (2009). Akusticheskaya model' kvazistatsionarnykh trass. Chast' 1. Kontseptsiya issledovaniy [The quasi-stationary lines acoustic model. Part 1. Research Concept]. *Hydroacoustical Journal (Problems, Methods and Means for Researches of World Oceans)*, 6, pp. 10-23. (in Russ)
 12. Andrianova, O.R., Skipa, M.I., Sryberko, A.V. et. al. (2015). Otsenka vozmozhnosti rascheta vertikalnogo raspredeleniya temperatury vody v Chernom more po sputnikovym dannym [Estimation of ability of vertical temperature distribution's calculation for the Black sea's water by satellite data]. *Odessa National University Herald. Series: Geography & Geology*, 20(4), pp. 9-21. (in Russ)
 13. Miladinova, S., Stips, A., Garcia-Gorriiz, E. et al. (2017). Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(7), pp. 5624-5644. <https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
 14. Fofonoff, N.P. & Millard, Jr. R. C. (1983). *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Technical Papers in Marine Sciences*. Paris, France, UNESCO, vol. 4. Available at: <http://hdl.handle.net/11329/109> (Accessed 19 September 2019)
 15. Kudryavaya, K.I., Seryakov, E.I. & Skriptunova, L.I. (1974). *Morskie gidrologicheskie prognozy [Marine hydrological forecasts]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ)
 16. Abuzyarov, Z.K., Kudryavaya, K.I., Seryakov, E.I. et. al. (1988). *Morskie prognozy [Marine forecasts]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ)
 17. Kobzar, A.I. (2006). *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists]*. Moscow: Fizmatlit. (in Russ)
 18. Eliseeva, I.I., Kuryshcheva, S.V., Kosteeva, T.V. et. al. (2007). *Ekonometrika [Econometrics]*. 2nd ed. Edited by I. I. Eliseeva. Moscow: Finance and Statistics. (in Russ)
 19. Hogg Robert, V., Tanis Elliot, A. & Zimmerman, D. (2015). *Probability and Statistical Inference. 9th ed.* Pearson Education, Inc., USA.
 20. Ahn, H. (2018). *Probability and Statistics for Science and Engineering with Examples in R Second Edition*. California, Cognella Inc. & University Readers.
 21. NOAA World Ocean Database. Available at: <http://www.nodc.noaa.gov> (Accessed 27 May 2019).
 22. Schlitzer, R. (2018). *Ocean Data View*. Available at: <https://odv.awi.de> (Accessed 19 September 2019).

METHODS FOR CALCULATING THE SPEED OF SOUND DISTRIBUTION BY WATER TEMPERATURE: CASE STUDY FOR THE BLACK SEA

O. R. Andrianova, A. V. Sryberko

*Hydroacoustics Branch of Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
3 Preobrazhenska st., 65082, Odesa, Ukraine,
olga_andr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6008-8812>
sryberko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7683-9628>*

The article presents the results of the research aimed at calculating the vertical speed of sound distribution in the active layer of the Black Sea based on water temperature readings. The research was carried out in the active layer of the deep-water section of the Black Sea at the depth range of 0 – 50 meters. The water temperature values taken at the hydrological stations or the shipboard measurements (OSD: Ocean Station Data) taken with the help of floats (PFL: Profiling Float Data) were used as initial data. The calculations were based on the identification of correlation relationships between the water temperature values at standard horizons of the Black Sea as per OSD data and the speed of sound calculated using the UNESCO equation. The calculation accuracy was estimated after comparing the speed of sound calculated by the established regression equations and by the UNESCO equation based on PFL data.

The research allowed establishing the regression equations for calculating the vertical speed of sound distribution in the Black Sea up to the depth of 50 meters over the spring-autumn period. The possibility of calculating the vertical speed of sound distribution using the developed regression equations was also estimated.

The calculations indicated statistically significant results over the spring-autumn period. Multiple correlation coefficients appeared to be significant and amounted to 0.99. The developed

regression equations were efficient and reliable. Verification of effectiveness and reliability of the regression equations showed that the standard error was within $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$.

In order to visualize the results the calculation of the vertical speed of sound distribution in the Black Sea using the regression equations was carried out for 6 hydrological sections (1 section for each of the months) introduced in 2018. The research showed that the isolines of the vertical speed of sound distribution calculated using the regression equations and the UNESCO equation are practically coherent.

The studied equations can be used for calculating the vertical speed of sound profile distribution in the Black Sea up to the depth of 50 meters over the May-October period based on the measured or modeled data of water temperature variability. This calculation can be used for the purposes of scientific research and applied purposes in the field of hydrography, hydroacoustics, oceanology, marine ecology, navigation etc.

Key words: the Black Sea; calculation of the speed of sound; water temperature; correlation relationship; regression equation.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЫ НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

О. Р. Андрианова, А. В. Сриберко

ГУ «Отделение гидроакустики Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины»,

ул. Преображенская, 3, 65082, Одесса, Украина,

olga_andr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6008-8812>

sriberko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7683-9628>

В статье представлены результаты исследований возможности расчета вертикального распределения скорости звука в деятельном слое Черного моря по температуре воды. Исследования проводились в деятельном слое глубоководной части Черного моря, на глубинах 0 – 50 метров. Исходными данными фактических значений температуры воды были станционные данные или данные судовых измерений (OSD – Ocean Station Data) и данные, измеренные с помощью поплавков (PFL – Profiling float data). Расчеты основывались на определении корреляционных связей между значениями температуры воды на стандартных горизонтах в Черном море по данным OSD и скоростью звука, рассчитанной по уравнению ЮНЕСКО. Оценка точности расчета проводилась методом сравнения значений скорости звука, рассчитанных по полученным уравнениям регрессии и по уравнению ЮНЕСКО, на основе PFL данных.

Получены уравнения регрессии для расчета вертикального распределения скорости звука в Черном море до глубины 50 метров в период весна – осень. Проведена оценка возможности расчета вертикального распределения скорости звука по полученным уравнениям.

Расчеты показали статистически значимые результаты в период весна – осень. Множественные коэффициенты корреляции значимы и составили 0,99. Разработанные уравнения регрессии эффективные и надежные. Проверка эффективности и надежности уравнений регрессии показала, что стандартная ошибка была в пределах $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$.

Для визуализации результатов, расчет вертикального распределения скорости звука в Черном море по уравнениям регрессии проводился по 6 гидрологическим разрезам (по 1 разрезу для каждого месяца) в 2018 году. Показано, что изолинии вертикального распределения скорости звука, рассчитанные по уравнениям регрессии и по уравнению ЮНЕСКО практически когерентны.

Полученные уравнения можно использовать для расчета вертикального распределения скорости звука до глубины 50 метров в Черном море в период май – октябрь на основе измеренных или смоделированных значений температуры воды. Данный расчет можно применять в научно-исследовательских и прикладных целях в области гидрографии, гидроакустики, океанологии, экологии моря, судоходства и др.

Ключевые слова: Черное море; расчет скорости звука; температура воды; корреляционная связь; уравнения регрессии.

Подання до редакції : 26. 10. 2019

Надходження остаточної версії : 25. 11. 2019

Публікація статті : 28. 11. 2019