

## ВПЛИВ АНОМАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ НА ГІДРОАКУСТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

І.І. ГЛАДКИХ<sup>1</sup>, Б.Б. КАПОЧКІН<sup>2</sup>, Н.В. КУЧЕРЕНКО<sup>2\*</sup>, М.Б. КАПОЧКІНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОНМА, м. Одеса, УКРАЇНА

<sup>2</sup>Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна

\*e-mail: tsb1@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Виконані дослідження впливу аномальних властивостей морської води на особливості поширення звуку в ній і, навпаки, акустичних хвиль різного частотного діапазону - на фізичні властивості води, що формують феномен наддалекого поширення звуку.

**Ключові слова:** аномальні властивості води; структура води; гідроакустика; підводний звуковий канал; позитивний зворотний зв'язок

## ANOMALOUS PROPERTIES OF WATER AND THEIR INFLUENCE ON HYDROACOUSTIC TECHNOLOGIES

I. GLADKYKH<sup>1</sup>, B. KAPOCHKIN<sup>2</sup>, N. KUCHERENKO<sup>2\*</sup>, M. KAPOCHKINA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ONMA, Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup>Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium ", Odessa, UKRAINE

**ABSTRACT** Was investigate the effect anomalous properties of seawater on the characteristics of sound in it. And conversely, acoustic waves of different frequency range -on the physical properties of water that forming, Very long phenomenon of sound in the ocean. Sonar technology used for navigation and for other tasks that require an understanding of the physical principles underlying the phenomena forming the main underwater sound channel and very long propagation in the marine environment. This was considered possible cause some anomalous properties of water, conducted a critical analysis of the characteristics of the marine environment, which affect the transfer of sound energy in it. It is shown that the temperature, salinity and pressure used in the calculation of the speed of sound in water by known formulas affect not directly but indirectly, through the formation of certain structures in the aquatic environment (mono-, nano- and supramolecular), which define those " abnormal "features of sound that recorded experimentally. Negative anomaly absorption of sound energy at low frequencies can be created on condition synchronization in space and time effects of changes in the structure of water while passing acoustic wave with the properties of the phenomenon itself (sound). The theory of Very long sound distribution should also take into account the effect of resonance, as a mechanism to reinforce a sound signal by coherent vibration process in the marine environment. At first sight, this may be due to coincidence acoustic wave periods and the period of natural oscillations compressibility of sea water.

**Keywords:** anomalous properties of water; water structure; hydroacoustic; underwater sound channel positive feedback

### Вступ

Існуючі локаційні системи за фізичним принципом дії діляться на радіолокаційні та лазерні, тобто ті, що використовують електромагнітні хвилі і, наприклад, гідролокаційні, що використовують механічні хвилі. Якщо швидкість електромагнітних хвиль незмінна, то швидкість звуку в морській воді є змінною величиною, що створює проблему визначення дистанції методами гідролокації. У разі застосування радіолокації, фіксуючи кутові характеристики відбитого сигналу та затримку в часі, вдається надійно визначати місце розташування відбивача (цілі). Методи лазерної локації дозволяють отримувати 3D цифрові моделі сканованих об'єктів, що в принципі недосяжно при використанні акустичних технологій. Для механічних хвиль зміна фазової швидкості призводить до зміни усіх характеристик хвилі, за винятком частоти. Зміна фазової швидкості механічних хвиль в реальному

об'ємі океану призводить до викривлення фронту хвилі - рефракції. У зв'язку з рефракцією, траєкторія поширення акустичного променя криволінійна [ 1]. Тому затримка у часі відбитого сигналу характеризує не відстань до об'єкту локації, а довжину шляху, яку пройшов акустичний сигнал. Практично завжди, довжина шляху перевищує дистанцію до об'єкту, іноді у декілька разів. У зв'язку з цим, кутові характеристики сигналу від об'єкту локації можуть бути використані для виявлення об'єкту тільки у разі володіння інформацією про тривимірний розподіл швидкості звуку в морському середовищі.

На рис. 1 схематично показані помилки ехолотування (глибини і місця відображення сигналу) в умовах позитивної рефракції спільно з: вертикальним розподілом швидкості звуку, очікуваною, реальною (нелінійною) траєкторією акустичного променя.

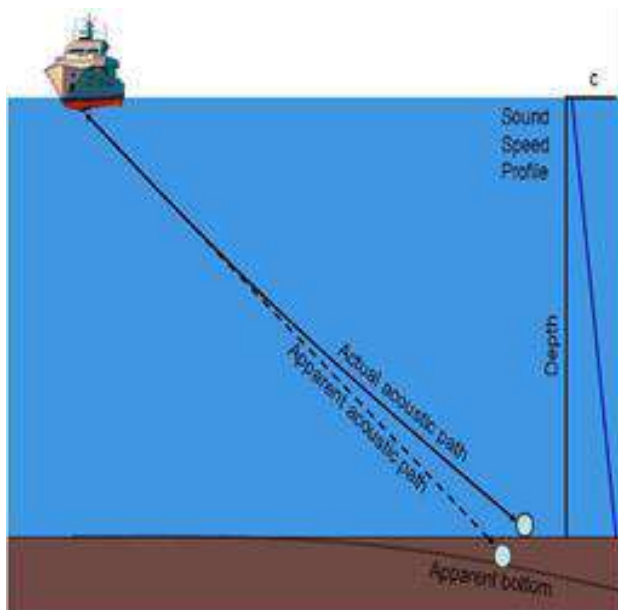


Рис. 1 - Помилки ехолотування в умовах позитивної рефракції [2]

Ефект рефракції особливо помітний при багатопробному ехолотуванні. З цієї ж причини фактична дальність дії гідроакустичних систем (ГАС) істотно менша за теоретичну [3]. 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 сигналу, траєкторію поширення звукового променя та функцію зміни фазової швидкості хвилі уздовж нього.

Результатом рефракції є також ймовірність формування між джерелом звуку та відбивачем (ціллю) зон акустичної тіні, що є дуже важливою проблемою для вирішення задач гідроакустичних технологій.

Іншою важливою проблемою є невизначеність наукового обґрунтування природного явища наддалекого поширення звуку в океані. Це явище використовується в інформаційній гідроакустиці для передачі інформації.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Перспективи розвитку гідроакустичних технологій, в умовах існуючої невизначеності просторово-часових змін швидкості звуку, повинно враховувати можливість відновлення тривимірного поля швидкості звуку за результатами визначення помилок реєстрації невідповідностей виміру та розрахунку дистанцій стаціонарними гідроакустичними антенами від джерел звуку з фіксованими координатами [4]. Врахування негативного ефекту рефракції для визначення цілей в морському середовищі пропонується реалізувати за допомогою мережі розподілених у водній товщі

вимірювачів швидкості звуку [5]. Важливо також враховувати значну часову мінливість вертикального розподілу швидкості звуку, яка має не тільки сезонний, але й добовий часовий масштаб, та характеризується дрібномасштабними просторово-часовими аномаліями вертикального розподілу швидкості звуку, що впливають на ефективність використання гідроакустичних методів.

Обмежені можливості застосування технологій, що використовують гідроакустичні методи, загальновідомі [6-11]. На поширення акустичних хвиль найбільший вплив мають процеси поглинання та розсіяння акустичної енергії від схвильованої поверхні моря та від донних відкладень. Після першого відбиття акустичної хвилі від морської поверхні та морського дна може фіксуватися дуже значне пониження інтенсивності звуку (рис.2).

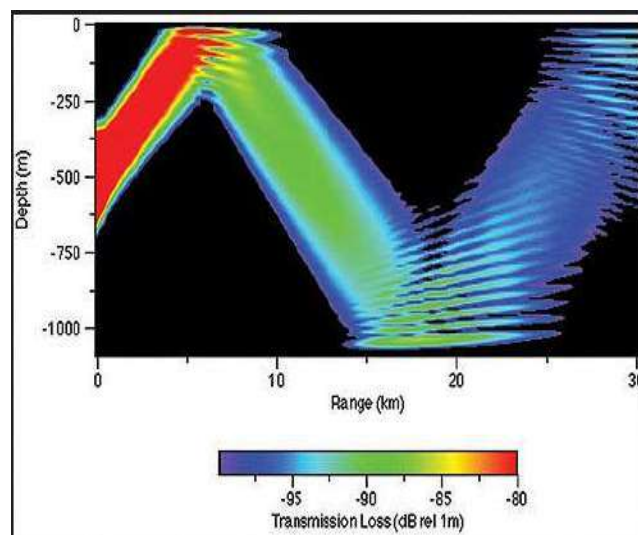


Рис. 2 - Приклад зміни інтенсивності звуку при поширенні акустичної хвилі (пониження інтенсивності від першого відображення від морської поверхні на 10 дБ та від дна - на 5 дБ) [12]

Різні типи ґрунтів по-різному послаблюють звук. У таблиці 1 приведені значення коефіцієнту відбиття та характеристики поглинання звуку в донних відкладеннях. Залежно від гранулометричного складу ґрунтів, коефіцієнт поглинання звукової енергії може відрізнятися на два порядки. Коефіцієнт відбиття акустичного сигналу збільшується при збільшенні щільності ґрунту. Наприклад у газонасичених мулах, відображення акустичної хвилі взагалі не відбувається.

Важливо відмітити, що при поширенні звуку у водній товщі, без відбиття від морської поверхні та від морського дна, втрати на поглинання та розсіяння будуть мінімальними, як наприклад, показано на рис. 3.

Таблиця 1 - Акустичні характеристики донних відкладень [13]

Тип ґрунту	Коефіцієнт відбиття	Густина (г/см <sup>3</sup> )	Швидкість звуку (км/с)	Затухання (дБ/м кГц)
Мул газонасичений	- 0,3 – 0,5	1,1 – 1,4	0,5 – 1,4	0,8 – 0,9
Мул рідкий	<0,15	1,45–1,5	1,1 – 1,2	0,04
Мул глинистий	0,15 – 0,2	1,45-1,46	1,4 - 1,5	0,08 - 0,1
Мул з алевритом та піском	0,2 – 0,27	1,41-1,48	1,6-1,7	0,2-0,3
Піски тонко та мілкозернисті	0,27-0,30	1,55-1,6	1,95-2,03	0,4-0,5
Піски крупнозернисті з гравієм	0,3-0,35	1,52-1,56	1,86-2,11	0,7
Гравій	0,35-0,4	1,55-1,65	2,05-2,3	0,9
Глини мілкопластичні	0,25-0,3	1,4-1,6	1,5-1,88	0,2-0,4
Глини щільні	0,3-0,42	1,52-1,59	1,82-1,98	0,48-0,61
Виходи корінних порід, скельні кристалічні, скельні осад. та літосф. походження	0,4-0,62	>6,6 3,6-6,6 3,1-4,0	>2,9 2,35-2,9 2,4-2,7	0,05-0,4

У роботі [14] показано, що використання формули обчислення швидкості звуку за показниками щільності та стисливості, на відміну від інших речовин, для води не є коректним.

Емпіричні формули розрахунку швидкості звуку в морській воді (Вільсона, Дель-Гроссо, Лероя) не мають необхідної точності [15, 16, 17, 18, 19, 20]. З нашої точки зору, це пов'язано з тим, що у якості аргументу, використовуються такі параметри як температура, солоність і глибина, що впливають на швидкість звуку не прямо, а опосередковано через густину та стисливість. Наприклад, збільшення температури показує на зміну густини води через збільшення відстані між молекулами та через руйнування структурних утворень. Одночасно збільшення відстаней між молекулами, при

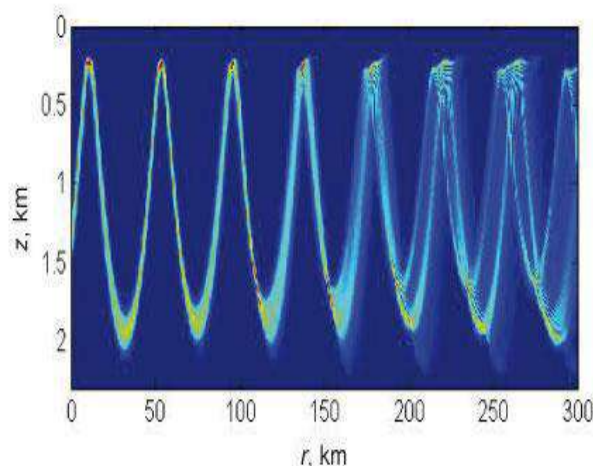


Рис. 3 - Поширення звуку у водній товщі без відбиття від морської поверхні та дна [12]

збільшенні температури, супроводжується збільшенням стисливості. При зміні солоності змінюється величина середньої молекулярної ваги суміші; також можна чекати зміну відстаней між молекулами суміші та виникнення/руйнування структурних утворень у воді. Зі збільшенням глибини, за умов зростання тиску, відбувається руйнування у воді структурних утворень. Причому, це руйнування, вірніше, зміна структури морської води, відбувається, з нашої точки зору, стрибкоподібно, при досягненні деякої критичної глибини (тиску), а не поступово у міру зростання тиску з глибиною. Цікаво, що зворотний процес - зміна структури води при зменшенні статичного тиску - відбувається з деякою затримкою. Щоб визначити порядок часової релаксації екстремально крайніх станів води, наприклад талої води, в рівноважний стан [21, 22]. І теоретично, і в результаті лабораторних досліджень цей час обчислюється 10 - 17 годинами. Таким чином, нестійкі метастабільні стани води зберігають свої властивості в звичайних умовах (при атмосферному тиску) досить тривалий час.

У зв'язку з цим, нами в роботі [14] зроблена спроба пояснити нетривалі горизонтальні градієнти швидкості звуку до 7 м/с на 1-2 км вертикальними переміщеннями водних мас, амплітудою 40 - 60 м. Було висловлено припущення про те, що при інтенсивному підйомі глибинних водних мас, які характеризуються високою швидкістю звуку, характеристика швидкості звуку в умовах падіння тиску, за рахунок інерції, на деякий час збережеться. За рахунок цього динамічного чинника при безперервному підйомі вод (наприклад, в зонах апвелінгу чи циклонічних вихорах) безперервно формуватиметься зона позитивної аномалії швидкості звуку. Таким чином, була сформульована теза про те, що вплив тиску на зміну структури води характеризується деякою інерційністю, що

підтвердилося теоретичними та лабораторними дослідженнями [22].

У зв'язку з існуванням відмінностей між розрахунковими та фактичними значеннями швидкості звуку, сформувався різні уявлення про міру впливу просторової мінливості швидкості звуку на рефракцію акустичних хвиль. Наприклад, прямими вимірами швидкості звуку в центрі вихрового утворення, де безперервно відбувається пересування по вертикалі вод з відмінними показниками швидкості звуку, встановлено, що при перетинанні вихору, зміни швидкості звуку в горизонтальній площині можуть на порядок перевищувати розрахункові значення, досягаючи 22-30 м/с [23]. Ці відмінності здатні формувати такі умови рефракції за вихровим утворення, що геометрія та розміри отриманого відображення будуть істотно спотворені.

У роботі [14] було показано, що як і раніше, актуальними завданнями сучасної гідроакустики є можливість врахування властивостей водного середовища змінювати 3D форму фронту подовжньої акустичної хвилі, і зворотна задача - оцінювати дію енергії стискання-розрідження подовжньої акустичної хвилі на зміну фізичних властивостей морської води.

#### Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Відомо, що швидкість звуку у будь-якому середовищі обернено пропорційна до міри стисливості речовини, а також її молекулярної ваги, як показника міри інерції молекул, які рухаються за рахунок акустичної енергії. Прийнято вважати, що зворотна залежність швидкості звуку від густини речовин реалізується тільки у разі, якщо густина змінюється за умови незмінної маси молекул в речовині [24]. У роботі [14] досліджено факт того, що на відміну від переважної більшості речовин, вода в температурному інтервалі від 0°C до 3,98°C має негативний коефіцієнт теплового розширення і при збільшенні густини на 0,00157 кг/м<sup>3</sup> замість очікуваного зниження швидкості звуку, спостерігається збільшення швидкості звуку на 19,2 м/с. Тобто, виникає парадокс збільшення швидкості звуку при збільшенні густини. У гідроакустиці була введена науково необґрунтована теза про те, що швидкість звуку у воді, нібито, залежить тільки від температури. Мабуть, це було зроблено для того, щоб «обійти» зазначений парадокс. Проте і термічна залежність швидкості звуку у воді виявилася неоднозначною.

Багатьма дослідниками позитивна аномалія густини при температурі 3,98°C пояснювалася структурними перебудовами водневих зв'язків на нанорівні [25]. У джерелі [26] цю аномалію у бідистильованій воді пояснюють максимальною активністю утворення надмолекулярних комплексів; а автори роботи [21] порівнюють воду, що має надмолекулярні комплекси, з емульсією. Реальність

існування «емульгованого» стану води вони підтверджують методом термічного аналізу води. У джерелі [27] також вказується на можливість існування "особливої фази води", що виникає при температурі 50°C. Це припущення базується на факті різкої зміни поверхневого натягу та коефіцієнта заломлення води.

Тому, можна припустити, що найбільш важливою характеристикою, що впливає на формування поля швидкості звуку в морській воді, є її структурованість (зміна мас осередків молекул, які рухаються за рахунок енергії акустичної хвилі). Вплив структурованості води на швидкість звуку в деякій мірі оцінений і в роботі [26]. Можна допустити, що найбільш значимі структурні перебудови у воді відповідають 36°C - температурі мінімальної теплоємності. Якщо врахувати важливу невідповідність, що температура 63°C відповідає мінімальній стисливості води (очікується максимальна швидкість звуку), а температура 75°C - максимальній швидкості звуку у воді, то можна припустити також, що руйнування так званих "емульгованих" структур не відповідає умовам мінімальної стисливості.

Крім цього, дотепер нема пояснення щодо розташування головного підводного звукового каналу (ПЗК) на глибинах 800 - 1000 м без фіксованих різких змін температури, солоності та тиску, та без фізичного обґрунтування причини наддалекого розповсюдження звуку у воді.

#### Виклад основного матеріалу

Як вказано в роботі [22], можливість генерації акустичних коливань при будь-яких хімічних реакціях і фізико-хімічних процесах витікає з об'єднаного рівняння першого і другого законів термодинаміки:

$$dG = pdV - TdS + \sum \mu_i dn_i + \phi dq + \sigma ds + \dots,$$

де G - енергія Гібса ; S - ентропія; T - температура; V - об'єм; p - тиск;  $\sigma$  - поверхневий натяг; s - площа поверхні;  $\mu_i$  - хімічний потенціал компонента; n - кількість моль компонента;  $\phi$  - електричний потенціал; q - електричний заряд. Таким чином, разом з широко відомими процесами прямого перетворення хімічної енергії в електричну ( $\phi dq$ ), теплову (TdS) і електромагнітну, повинне відбуватися безпосереднє перетворення її в механічну енергію (pdV). Який процес переважатиме, визначається умовами. Якщо переважно змінюватиметься ентропія S, то це приведе до того, що велика частина енергії, що вивільняється, трансформується в тепло; якщо переважно змінюватиметься об'єм V - то це викличе перетворення істотної частини хімічної енергії на механічну роботу, що індукує акустичні коливання. Крім того схоже, що і ентропія (моментальна міра впорядкованості) при її зміні змінює об'єм, тобто може бути також джерелом акустичних коливань при

швидких змінах ентропії. У гомогенному рідкому середовищі перетворення хімічної енергії на механічну роботу, у тому випадку, коли взаємодія відбувається у вигляді окремого молекулярного акту, дає одиничний акустичний імпульс з настільки малою енергією, що внаслідок процесів дисипації в середовищі він швидко затухає. Але у тому випадку, коли перетворення хімічної енергії відбувається одночасно у вигляді сотень тисяч окремих молекулярних актів у нано- чи великих надмолекулярних утвореннях, то енергії, що виділяється, може виявитися досить для реєстрації акустичних коливань. Відомо, що акустична емісія (АЕ) легко реєструється при розчиненні у воді різних солей, змішуванні гомогенних рідин, плавленні льоду, хімічних реакціях та в інших аналогічних процесах. Тому автори [22] скористалися цим методом для доказу існування структурних утворень у воді та дослідження динаміки їх перетворень, наприклад, за кількістю імпульсів, активністю АЕ, тривалістю та часом наростання амплітуди сигналу.

На нашу думку, за рахунок моно-, нано- та надмолекулярних комплексів вода одночасно має різні оцінки «маси» асоціацій. Хвилі стискання - розрідження в такому середовищі поширюватимуться зі швидкістю, залежною від міри асоційованості молекул морської води. Одночасно руйнування нано- та надмолекулярних комплексів у воді відбувається під дією тиску, що швидко змінюється при проходженні акустичної хвилі, і температури, що є мірою впорядкованості. На фронті акустичної хвилі спостерігається позитивна аномалія тиску. В області стискання на фронті акустичної хвилі, де швидкість звуку (під впливом тиску і підвищення температури) вища, фазова швидкість переміщення фронту хвилі отримує прискорення.

Енергія на фронті стискання акустичної хвилі може витрачатися на руйнування асоційованих систем міжмолекулярних зв'язків у воді, а не тільки на перехід в кінетичну енергію молекул - підвищення температури. Відповідно до [28], при відновленні одного розірваного міжмолекулярного зв'язку на кожні 10 молекул води, екзотермічний процес досягає рівня 400 кілоджоулів/кг. Можна припустити, що це і є енергія підкачування акустичної хвилі (на стадії розрідження) – одна з головних причин наддалекого поширення звуку у воді. Таким чином, акустична хвиля, як хвиля стискання - розрідження, поширюючись в абсолютно аномальній речовині - воді, формує процеси, що сприяють збільшенню швидкості звуку: зростання температури, зменшення молекулярної маси (фаза стискання), виділення енергії при відновленні міжмолекулярних зв'язків (фаза розрідження). Таким чином середовище, перетворюючись в процесі дії на нього зовнішньої сили, створює сприятливі умови (виділяє енергію, зменшує масу асоційованих молекул) для поширення в ній ефекту, що створюється цією силою, - звукової хвилі. Цей причинно-наслідковий зв'язок називається

позитивним зворотним зв'язком, який дуже рідко зустрічається в природних (небіологічних) явищах, зазвичай спрямованих на збільшення ентропії (розсіяння енергії) та приведення системи в рівноважний стан. Проте оскільки природне водне середовище ніколи не буває однорідним, без домішок і розчинених в ній речовин, то, безумовно, в ньому відбуваються і втрати акустичної енергії за рахунок відбиття, розсіяння та поглинання. Тому, процес не переходить в саморуйнівний, а швидше нагадує високопродуктивний цикл, що дуже повільно затухає.

Розглянемо, як проявляються ці процеси для акустичних хвиль в широкому спектральному діапазоні частот. Встановлено, що при випромінюванні акустичної енергії на ультразвукових частотах (УЗ, в міліметровому діапазоні довжин хвиль), в морському середовищі реєструються об'ємні теплові молекулярні акустичні шуми. Для цих довжин хвиль практично повне поглинання звуку відбувається на відстані до 200 м. Також встановлено, що на верхній межі інфразвуку теплових шумів практично немає [24]. Тобто, на УЗ частотах процес формування ідеальних умов у морській воді для поширення акустичних хвиль, описаних вище, не встигає сформуватися протягом часу, що дорівнює періоду хвилі. Тому певна доля акустичної енергії витрачається на релаксаційні процеси, які не беруть участі в процесі поширення акустичних хвиль, як частини процесу позитивного зворотного зв'язку, що описаний вище. При поширенні довгих акустичних хвиль ці процеси синхронізовані в часі (що можна було б в першому наближенні назвати резонансом). Тому при взаємодії акустичної хвилі верхньої межі інфразвуку з водним середовищем, дисипація акустичної енергії у вигляді теплових шумів не фіксується.

Таким чином, процес передачі звуку в морському середовищі можна назвати адіабатичним відповідно до припущення Ньютона (тобто без обміну енергією з тією частиною середовища, де звукова хвиля в даний момент не поширюється) тільки на низьких частотах.

При збільшенні довжини хвилі збільшується ширина та об'єм фронтальної області з аномально високими характеристиками тиску і, відповідно, збільшується тривалість існування умов стискання середовища. На частоті 20 Гц довжина хвилі досягає 72,5 м, тобто ширина фронтальної області інтенсивного стискання морського середовища перевищує 20 м, а сам процес стискання триває до 0,1 сек. На підтвердження цього в таблиці 2 показано залежність дальності дії гідроакустичних систем від випромінюваної довжини акустичної хвилі.

На частотах до 100 кГц поглинання звуку пропорційне частоті в ступені приблизно 3/2 [29]. Нами в більш широкій смузі частот отримана експоненційна залежність поглинання звуку залежно від частоти:

$$L = \epsilon(-0.18011 \cdot \nu + 4.8632),$$

де  $L$  - дальність розповсюдження звуку в км,  
 $\nu$  - частота в кГц.

Таблиця 2 – Дальність дії гідроакустичних систем залежно від довжини хвилі [29]

Частота акустичного сигналу	Довжина хвилі акустичного сигналу	Дальність дії
100 Гц	15 м	1000 км і більше
1 кГц	1,5 м	100 км і більше
10 кГц	15 см	10 км
25 кГц	6 см	3 км
50 кГц	3 см	1 км
100 кГц	1,5 см	600 м
500 кГц	3 мм	150 м
1000кГц	1,5 мм	50 м

Виявлена на низьких частотах негативна аномалія поглинання звукової енергії в морській воді лежить в основі відкриття природного явища «наддалекого поширення звуку» [30]. В роботі [31] приведена інформація про результати виміру дальності поширення звуку в підводному звуковому каналі від вибуху тротилового заряду вагою 2,7 кг: вибух був зафіксований на відстані 5750 км з часовою затримкою більше години, а тривалість прийнятого сигналу вибуху досягала 1 хвилини. Важливо ще раз підкреслити, що експериментально зафіксована аномалія наддалекого поширення звуку в океані до теперішнього часу не мала чіткого теоретичного пояснення. Вірніше, питання формування ПЗК на глибині мінімуму швидкості звуку логічно пояснюється через ефект рефракції, а ось саме виникнення різкої зміни негативного вертикального градієнта швидкості звуку на позитивний не має фізичного обґрунтування.

Нами були проведені розрахунки та порівняльний аналіз вертикального розподілу густини морської води та швидкості звуку на стандартних горизонтах за даними, отриманими в різних районах Світового океану в різні сезони (Тихий океан, Атлантичний, Північний Льодовитий океан, [32]). Було проаналізовано також розподіл температури та солоності більше, ніж на 100 гідрологічних станціях. За різними рівняннями стану (емпіричні формули Кнудсена та К°, П.С. Лінсейкіна, О.І. Мамаєва, формулою спеціалістів Морського гідрофізичного інституту АН України) на кожній станції за даними температури, солоності та тиску була розрахована густина морської води на стандартних горизонтах та швидкість звуку за формулами Дель-Гросо та Вільсона [33]. Порівняльний аналіз отриманих результатів розрахунків показав, що:

ні одна формула для визначення густини морської води не дозволяє отримати розрахунок фактичної різкої зміни тенденції зменшення швидкості звуку на зростання на певних глибинах, (звичайно це 800 – 1000 м);

ні температура, ні солоність не є причиною зміни тенденції зменшення швидкості звуку на зростання, тобто на формування головного ПЗК на вище зазначених глибинах (температура і солоність на зазначених глибинах практично не змінюються).

У світлі приведених вище досліджень цей результат не є неочікуваним. Адже у формулах розрахунку густини морської води не враховується такий важливий фактор як структура води, яка суттєво впливає на її щільність. Наприклад, за температури 0°C, коли прісна вода знаходиться одночасно у двох станах, рідкому та твердому, тільки за рахунок різної структури води густина її відрізняється практично на 10%. Таким чином, один з головних чинників, який впливає практично на всі властивості морської води, не враховується при визначенні не тільки густини, а й усіх інших базових характеристик морської води, до яких відноситься і швидкість звуку. І саме структура води, а скоріше, її різка зміна при досягненні певного критичного тиску (глибини) є причиною різкого переходу зменшення швидкості звуку на зростання з формуванням на цій глибині мінімуму швидкості звуку (осі головного підводного звукового каналу).

## Висновки

Вода – найпоширеніший на поверхні Землі мінерал, який має абсолютно аномальні властивості, якщо використати стандартне порівняння з властивостями з'єднань водню з елементами VI групи Таблиці елементів Д.І.Менделєєва (найлегших з'єднань підгрупи кисню). Завдяки дипольному моменту та можливості виникнення водневого зв'язку та формуванню, завдяки йому, асоціації молекул води на нано- та надмолекулярному рівні, вода стає унікальним середовищем, в якому можливі такі явища як наддалеке розповсюдження звуку. Негативна аномалія поглинання звукової енергії на низьких частотах завдячує позитивній синхронізації в просторі та часі ефектів зміни стану морського середовища, при проходженні акустичної хвилі, з властивостями самого явища (звуком).

Ефект наддалекого поширення звуку, поряд з задачами інформаційної гідроакустики, може бути використаний в гідроакустичній пеленгації підводних човнів. В [34, 35] передбачається можливість виявлення низькочастотних сигналів, що створюються в полі тиску за рахунок рухів корпусу та рулів підводних човнів. Зі збільшенням довжини хвилі, починаючи з метрового діапазону, посилюється явище дифракції, внаслідок чого акустична хвиля огинає перешкоди і не формує відбитий сигнал. Однак, низькочастотні акустичні хвилі викликають

вібрацію великих об'єктів унаслідок збігу їх частот та виникненню явища резонансу.

На нашу думку, теорія наддалекого поширення звуку повинна враховувати також і ефект резонансу, як механізму підживлення акустичного сигналу енергією когерентного коливального процесу в морському середовищі. У першому наближенні це може бути також пов'язано зі збігом періодів акустичної хвилі та періоду власних коливань стисливості морської води.

#### Список літератури

1. **Roux, P.** Analyzing sound speed fluctuations in shallow water from group-velocity versus phase-velocity data representation / **P. Roux, W. A. Kuperman, B. D. Cornuelle, et. al.** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2013. – 133:1945-1952. – doi: 10.1121/1.4792354.
2. Режим доступу: Refraction Correction <https://confluence.qps.nl/display/KBE/Refraction+Correction>.
3. Режим доступу: <http://www.akvilona.ru/news/dsit-pointshield.htm>.
4. **Гладких, І. І.** Современный уровень технологий, использующих гидроакустические методы для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ / **І. І. Гладких, М. Б. Капочкіна, В. Ю. Зорін** // *Первый независимый научный вестник «технические науки»*. – 2015. – №1. – Т. 2000. – с. 47-54.
5. Режим доступу: Moving Vessel Profiler [http://www.brooke-ocean.com/mvp\\_main.html](http://www.brooke-ocean.com/mvp_main.html).
6. Режим доступу: [http://www.omg.unb.ca/~jhc/coverage\\_paper.html#cov\\_306](http://www.omg.unb.ca/~jhc/coverage_paper.html#cov_306).
7. **Clarke, J. E. H.** The Challenge of Technology: Improving Sea-Floor Mapping Methodologies part of : Visualizing the Sea Floor : Mapping Submarine Landscapes / **John E. Hughes Clarke** // *Symposium on: Visualizing and Looking Beyond Earth American Association for the Advancement of Science* – Canada – February 18th, 2002. – Abstract ID-AAAS-57844.
8. **Wong, G. S.** Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure / **G. S. Wong, S. K. George; Zhu, Shi-ming** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1995. – 97(3). – pp. 1732-1736 – doi: h10.1121/ 1.413048.
9. Режим доступу: [http://www.omg.unb.ca/AAAS/UNB\\_Seafloor\\_Mapping.html](http://www.omg.unb.ca/AAAS/UNB_Seafloor_Mapping.html).
10. Режим доступу: The COMET Program <http://www.met.ed.ucar.edu/oceans/hydrography/print.htm>.
11. **Medwin, H.** Fundamentals of Acoustical Oceanography / **H. Medwin & C. S. Clay** Academic, Boston. – 1998. – 283 p.
12. Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater\\_acoustics](https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustics).
13. Режим доступу: <http://www.imtp.febras.ru/images/stories/konf/tpomo-5-30-sentjabrja4oktjabrja2013/pdf/sekcija2.pdf>.
14. **Гладких, І. І.** Перспективы технологий, использующих гидроакустические методы, для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ / **І. І. Гладких, Н. В. Кучеренко, М. Б. Капочкіна, В. Ю. Зорін** // *Первый независимый научный вестник: технические науки*. – 2015. – №2, Т. 2000. – с. 60-66.
15. **Kenneth, V.** Discussion of sea-water sound-speed determinations / **V. Kenneth, I. Mackenzie** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1981. – 70 (3): 801–806. – doi:10.1121/1.386919.
16. **Wong, G.S.** Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure / **G. S. Wong, S. K. George; Zhu, Shi-ming** // *Journal of the Acoustical Society of America* – 1995. – 97 (3): 1732. – doi:10.1121/1.413048.
17. **Speisberger, J.L.** Is Del Grosso's sound-speed algorithm correct ? / **J.L. Speisberger** //– *Journal of the Acoustical Society of America*.– 1993. – 93(4). – pp. 2235-2237 – doi:10.1121/1.406686.
18. **Belogol'skii, V. A.** Pressure dependence of the sound velocity in distilled water / **V. A. Belogol'skii, S. S. Sekoyan, L. M. Samorukova, S. R. Stefanov, and V. I. Levstov** // *Meas. Tech.* – 1999. – 42. – pp. 406–413 – doi:10.1007/BF02504405.
19. **Leroy, C. C.** Depth-pressure relationships in the oceans and seas / **C. C. Leroy** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2007. – 121, 2447 E. – doi:10.1121/1.2988296.
20. **Dushaw, Brian D.** On Equations for the Speed of Sound in Seawater / **Brian D. Dushaw, P. F. Worcester, B. D. Cornuelle, B. M. Howe** // *Journal of the Acoustical Society of America*.– 1993. – 93 (1): 255–275. – doi:10.1121/1.405660.
21. **Смирнов, А. Н.** Супранадмолекулярные колмплексы воды / **А. Н. Смирнов, А. В. Сыроежкин** // *Российский химический журнал*. – 2004. – №2. – т. XLVIII [режим доступу: [www.chem.msu.ru/rus/jvho/2004-2/125.pdf](http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2004-2/125.pdf)].
22. **Смирнов, А. Н.** Надмолекулярные комплексы воды: «эмульоны» / **А. Н. Смирнов** // *Физика живого* – 2010. – №2 – Т. 18 – С.23-33. [режим доступу: [www.pa.sciecenter.net](http://www.pa.sciecenter.net)]
23. **Богданов, К. Т.** Условия формирования трехмерного звукового канала и гидролого-акустические характеристики вихрей Камчатского течения / **К. Т. Богданов, Ф. Ф. Храпченков** // *Изв. РАН, ФАО*. – 1994. – Т.30, – № 1. – С. 100-106.
24. **Бабий, В.И.** Влияние звукового поля на параметры термодинамического состояния воды. Роль нелинейных эффектов / **В.И. Бабий** // *Тематический выпуск: Экологія. Море и человек*.— 2013. — №9 (146). — С. 35-39.
25. **Chen, B.** Hydrogen Bonding in Water / **B. Chen, I. Ivanov, M.I. Klein, M. Parrinello** // *Phys.Rev. Lett.* – 2003. – 91 (21), 21/55503). – doi:10.1103/PhysRev Lett. 91.215503.
26. Режим доступу: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Sound/SoundSpeedTable1/>.
27. Режим доступу: <http://oko-planet.su/science/scienceday/350888-uchenye-obnaruzhili-novoe-udivitelnoe-svoystvo-vody.html>.
28. Режим доступу: <http://www.bibliotekar.ru/2vodaKak.htm>.
29. Режим доступу: [http://www.akin.ru/spravka/s\\_ocean.htm](http://www.akin.ru/spravka/s_ocean.htm).
30. Режим доступу: <http://slovar.cc/enc/bse/2039285.html>.
31. Режим доступу: <http://mash-xxl.info/info/363227>.
32. Режим доступу: Speed of Sound in Sea-Water, NPL, UK. Available at <http://www.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater>. Google Scholar.
33. **Del Grosso, V. A.** New equation for speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations) / **V. A. Del Grosso** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1974 – 56 (4) – pp. 1084–1091. – doi:10.1121/1.1903388.
34. Режим доступу: [http://vpk.name/news/109649\\_est\\_li\\_v\\_rossii\\_sovremennoe\\_gidroakusticheskoe\\_vooruzhenie\\_chast\\_3.html](http://vpk.name/news/109649_est_li_v_rossii_sovremennoe_gidroakusticheskoe_vooruzhenie_chast_3.html).
35. **Bouyoucos, J. V.** Hydroacoustic low frequency transducers / **J. V. Bouyoucos and R. L. Selsam** // *The Journal of the Acoustical Society of America Volume*. – 2005. – 65 (1). – P.

127. Issue S1 10.1121/1.2017029. –  
doi:http://dx.doi.org/10.1121/1.2017029.

#### Bibliography (transliterated)

1. Roux, P., Kuperman, W. A., Cornuelle, B. D., Aulanier, F. at all. Analyzing sound speed fluctuations in shallow water from group-velocity versus phase-velocity data representation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133, 1945-1952, doi: 10.1121/1.4792354.
2. Rezhym dostupu: Refraction Correction <https://confluence.qps.nl/display/KBE/Refraction+Correction>.
3. Rezhym dostupu: <http://www.akvilona.ru/news/dsit-pointshield.htm>.
4. Gladkih, I. I., Kapochkina, M. B., Zorin, V. Yu. Sovremennyiy uroven tehnologiy, ispolzuyuschih gidroakusticheskie metody dlya obespecheniya navigatsii i morskikh poiskovo-spatatelnyih rabot, [The present level of technology, using the hydroacoustic methods for navigation and maritime search and rescue] *Pervyyi nezavisimyyi nauchnyiy vestnik «tehnicheskie nauki» [First independent scientific bulletin: "Engineering sciences"]*. Kiev, 2015, 1 (2000), 47-54.
5. Rezhym dostupu: Moving Vessel Profiler [http://www.brooke-ocean.com/mvp\\_main.html](http://www.brooke-ocean.com/mvp_main.html).
6. Rezhym dostupu: [http://www.omg.unb.ca/~jhc/coverage\\_paper.html#cov\\_306](http://www.omg.unb.ca/~jhc/coverage_paper.html#cov_306).
7. Hughes, Clarke, John E. The Challenge of Technology: Improving Sea-Floor Mapping Methodologies part of: Visualizing the Sea Floor. *Mapping Submarine Landscapes Symposium on: Visualizing and Looking Beyond Earth American Association for the Advancement of Science, Canada, February 18th*, 2002, Abstract ID-AAAS-57844. doi: 10.1007/119149526.
8. Wong, G. S. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 97(3), 1732-1736, doi: 10.1121/1.413048.
9. Rezhym dostupu: [http://www.omg.unb.ca/AAAS/UNB\\_SeaFloor\\_Mapping.html](http://www.omg.unb.ca/AAAS/UNB_SeaFloor_Mapping.html).
10. Rezhym dostupu: The COMET Program <http://www.meted.ucar.edu/oceans/hydrography/print.htm>.
11. Medwin, H. & Clay, C. S. Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic, Boston, 1998, 283.
12. Rezhym dostupu: [https://en.wikipedia.org/wiki/underwater\\_acoustics](https://en.wikipedia.org/wiki/underwater_acoustics).
13. Rezhym dostupu: <http://www.imtp.febras.ru/images/stories/konf/tpomo-5-30-sentjabrja-4-oktjabrja-2013/pdf/sekcija2.pdf>.
14. Gladkih, I. I., Kucherenko, N. V., Kapochkina, M. B., Zorin, V. Yu. Perspektivnyi tehnologiy, ispolzuyuschih gidroakusticheskie metody, dlya obespecheniya navigatsii i morskikh poiskovo-spatatelnyih rabot [Technology Perspectives, using hydroacoustic methods for navigation and maritime search and rescue operations]. *Pervyyi nezavisimyyi nauchnyiy vestnik (tehnicheskie nauki) [First independent scientific bulletin "Engineering sciences"]*. Kiev, 2015, 2 (2000), 60-66.
15. Mackenzie, Kenneth V.. Discussion of sea-water sound-speed determinations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, 70 (3): 801-806, doi:10.1121/1.386919.
16. Wong, G. S., George, S. K.; Shi-ming, Zhu. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 97 (3): 1732. doi:10.1121/1.413048.
17. Speisberger, J. L. Is Del Grosso's sound-speed algorithm correct?. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 93(4), 2235-2237.
18. Belogol'skii, V. A., Sekoyan, S. S., Samorukova, at all. Pressure dependence of the sound velocity in distilled water. *Meas. Tech.*, 1999, 42, 406-413.
19. Leroy, C. C. Depth-pressure relationships in the oceans and seas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121, 2447E.
20. Dushaw, Brian D., Worcester, P. F., Cornuelle, B. D., Howe, B. M. On Equations for the Speed of Sound in Seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 93 (1), 255-275. doi:10.1121/1.405660.
21. Smirnov, A. N., Syirozhkin, A. V. Supranadmolekulyarnyye kolleksiyyi vodyi [Supramolecular water systems.], *Rossiyskiy himicheskiy zhurnal [Russian chemical journal]*, 2004, 2 (XLVIII), . [[www.chem.msu.ru/rus/jvho/2004-2/125.pdf](http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2004-2/125.pdf)]
22. Smirnov, A. N. Nadmolekulyarnyye kompleksiyyi vodyi: «emulonyi» [Supramolecular complexes of water, "emulony"] *Fizika zhivogo [Physics of the living]*, 2010, 2 (18), 23-33.
23. Bogdanov, K. T., Hrapchenkov, F. F. Usloviya formirovaniya trekhmernogo zvukovogo kanala i gidrologo-akusticheskie harakteristiki vihrey Kamchatskogo techeniya [Conditions of formation of three-dimensional of the sound channel; hydrological and acoustic characteristics of the vortices current Kamchatka]. *Izv. RAN, FAO [Proceedings of the Russian Academy of Sciences; Atmospheric and Oceanic Physics]*. 1994, 1(30), 100-106.
24. Babiy, V. I. Vliyaniye zvukovogo polya na parametryi termodinamicheskogo sostoyaniya vodyi. Rol nelineynyih effektiv [Influence of the sound field on the thermodynamic parameters of the water's state. The role of the nonlinear effects]. *Tematicheskii vyipusk: Ekologiya. More i chelovek [The thematic issue: Ecology: Sea and the people]*. 2013, 9 (146), 35-39.
25. Chen, B., Ivanov, I., Klein, M. I., Parrinello, M. Hydrogen Bonding in Water. *Phys.Rev. Lett.*, 2003, v. 91(21), doi: 10.1103/PhysRevLett.91.215503.
26. Rezhym dostupu: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Sound/SoundSpeedTable1/>.
27. Rezhym dostupu: <http://oko-planet.su/science/scienceday/350888-uchenye-obnaruzhili-novoe-udivitelnoe-svoystvo-vody.html>.
28. Rezhym dostupu: <http://www.bibliotekar.ru/2vodaKak.htm>.
29. Rezhym dostupu: [http://www.akin.ru/spravka/s\\_ocean.htm](http://www.akin.ru/spravka/s_ocean.htm).
30. Rezhym dostupu: <http://slovar.cc/enc/bse/2039285.html>.
31. Rezhym dostupu: <http://mash-xxl.info/info/363227>.
32. Rezhym dostupu: Speed of Sound in Sea-Water, NPL, UK. Available at <http://www.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater>. Google Scholar.
33. Del Grosso, V. A. New equation for speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 56 (4), 1084-1091. doi:10.1121/1.1903388.
34. Rezhym dostupu: [http://vpk.name/news/109649\\_est\\_li\\_v\\_rossii\\_sovremennoe\\_gidroakusticheskoe\\_vooruzhenie\\_chast\\_3.html](http://vpk.name/news/109649_est_li_v_rossii_sovremennoe_gidroakusticheskoe_vooruzhenie_chast_3.html).
35. Bouyoucos, J. V., Selsam, R. L., Hydroacoustic low frequency transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 65 (1), 127, doi:10.1121/1.2017029.



## Відомості про авторів (About authors)

**Гладких Ігор Іванович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрографії та морської геодезії, ОНМА, м. Одеса, Україна; e-mail: gladkykh958@gmail.com

**Igor Gladkih** – doctor of engineering sciences, professor, manager of department of hydrography and marine geodesy, ONMA, Odessa, Ukraine; e-mail: gladkykh958@gmail.com.

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

**Boris Kapochkin** - doctor of philosophy, Senior Researcher, Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " Odessa; Ukraine, e-mail: tsb1@ukr.net.

**Кучеренко Наталія Василенна** – кандидат географічних наук, доцент, провідний науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна; e-mail: tsb1@ukr.net.

**Natalia Kucherenko** - Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Senior Researcher, Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " Odessa, Ukraine; e-mail: tsb1@ukr.net.

**Капочкіна Маргарита Борисівна**, молодший науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна; e-mail: tsb1@ukr.net.

**Marharyta Kapochkina** - junior scientist, Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " Odessa, Ukraine; e-mail: margo-92@ukr.net.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Гладких, І. І.** Вплив аномальних властивостей води на гідроакустичні технології / **І. І. Гладких, Б. Б. Капочкін, Н. В. Кучеренко, М. Б. Капочкіна** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 164-172. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23.

*Please cite this article as:*

**Gladkykh, I., Kapochkin, B., Kucherenko, N., Kapochkina M.** Anomalous properties of water and their influence on hydroacoustic technologies. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 7 (1229), 164–172, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Гладких, И. И.** Влияние аномальных свойств воды на гидроакустические технологии / **И. И. Гладких, Б. Б. Капочкин, Н. В. Кучеренко, М. Б. Капочкина** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 164-172. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23.

**АННОТАЦИЯ** Выполнены исследования влияния аномальных свойств морской воды на особенности распространения звука в ней и, наоборот, акустических волн разного частотного диапазона - на физические свойства воды, которые формируют феномен сверхдальнего распространения звука.

**Ключевые слова:** аномальные свойства воды; структура воды; гидроакустика; подводный звуковой канал; положительная обратная связь

*Надійшла (received) 18.02.2017*