

© Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б.

ШЛЯХИ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ПОШУКУ І ПОРЯТУНКУ НА МОРІ В УМОВАХ ТРЕТЬОЇ СВІТОВОЇ ВІЙНИ НОВОГО ГІБРИДНОГО ТИПУ (SAR)

Міжнародна система пошуку і порятунку (SAR) у морському транспорті традиційно спирається на електромагнітні та супутникові канали зв'язку і позиціонування COSPAS-SARSAT, GMDSS, ефективність яких у війні нового гібридного типу знижується через РЕБ, спуфінг та інші форми електромагнітної зброї. У статті обґрунтовано напрями трансформації SAR, які пов'язані з поверненням до гідроакустичних засобів моніторингу та позиціонування місць катастроф на базі хвилеводу SOFAR як каналу, стійкого до електромагнітних впливів, та придатного для прихованої атрибуції підводних інцидентів, критичних для безпеки судноплавства й підводної інфраструктури. Показано, що емпірична гідроакустика не дозволяє пояснити просторову мінливість ефективності SOFAR, а також його практично відсутність у Чорному та Середземному морях, що має прямі наслідки для майбутніх маршрутів і логістики морського транспорту з урахуванням ризиків сучасної SAR. Запропоновано фізичну інтерпретацію формування SOFAR на основі теорії Ньютон—Лапласа з акцентом на ролі пружності води та структурних ефектів, притаманних виключно водному середовищу. Отримані результати формують наукові підстави для інтеграції пасивних донних і мережевих гідроакустичних систем у SAR морського транспорту як резервного/дублюючого контуру в умовах гібридної війни: ризиків диверсій, аварій і втрати зв'язку.

Ключові слова: морський транспорт; пошук і порятунок (SAR); підводна інфраструктура; гідроакустичний хвилевід SOFAR; структура води; швидкість звуку, гібридна війна.

Постановка проблеми. Міжнародна система пошуку і порятунку (SAR - Search and Rescue) ґрунтується на гармонізованому застосуванні авіаційних та морських (надводних і підводних) технологій з метою своєчасного виявлення осіб і об'єктів, що зазнали лиха, та організації рятувальних операцій. Ключовими елементами глобальної архітектури SAR є супутникова система виявлення сигналів лиха COSPAS-SARSAT, яка забезпечує виявлення та локалізацію аварійних маяків (EPIRB - на суднах, ELT - на повітряних суднах, PLB - для окремих осіб). Зазначена система включає орбітальні сегменти LEOSAR, GEOSAR і MEOSAR, наземні станції прийому (LUT) та центри управління місіями (MCC). Доповнювальним елементом є Глобальна морська система зв'язку під час лиха та для забезпечення безпеки (GMDSS), яка забезпечує передачу сигналів лиха, координацію дій і зв'язок між учасниками рятувальних операцій, зокрема з використанням супутникових систем зв'язку Inmarsat та радіомаякових засобів. Сукупно ці компоненти забезпечують глобальне покриття, швидке реагування та міжнародну координацію, що дозволяє рятувати тисячі людських життів щорічно.

Водночас сучасні безпекові умови характеризуються трансформацією характеру збройних конфліктів у напрямі війн нового гібридного типу, початок яких у науковому та військово-політичному дискурсі пов'язують з 2013 роком. Дослідження присвячене визначенню перспектив удосконалення системи SAR в умовах гібридної війни. Актуальність цієї проблематики підтверджується аналізом положень, викладених у публікації [1], у якій акцентується увага на досягненні стратегічних цілей без повномасштабної війни, розмитті меж між станами війни та миру, а також на переважанні невоєнних засобів впливу над військовими з одночасним анонімним застосуванням сили через проксі-структури та спеціальні операції [1].

Практичним підтвердженням зазначених положень є події у Балтійському морі у 2023–2025 роках, пов'язані з диверсіями проти підводних кабельних систем. Як зазначається в аналітичному

звіті Atlantic Council «How the Baltic Sea Nations Have Tackled Suspicious Cable Cuts» (2025), під час цих інцидентів фіксувалися анонімні атаки радіоелектронної боротьби, зокрема спуфінг сигналів глобальних навігаційних супутникових систем, що використовувався для створення навігаційної та інформаційної невизначеності [2].

У цих умовах як один із можливих напрямів підвищення стійкості системи SAR розглядається повернення та інтеграція гідроакустичних засобів спостереження. Особливий інтерес становить використання гідроакустичного каналу SOFAR (*Sound Fixing and Ranging*), який забезпечує наддалеке поширення низькочастотних звукових сигналів в океані. На відміну від електромагнітних каналів зв'язку і позиціонування (радіозв'язок, GPS, супутникові системи), які є вразливими до засобів радіоелектронної боротьби, спуфінгу та навмисного глушіння, канал SOFAR не використовує електромагнітний спектр, а отже не піддається впливу потужних електромагнітних перешкод або обману навігаційних сигналів. В умовах сучасної гібридної війни, що часто ведеться анонімно та без чітко вираженої кінетичної фази, а засоби радіоелектронної боротьби та кібероперації застосовуються для створення невизначеності та порушення функціонування інформаційних систем, використання SOFAR надає можливість здійснювати пасивний, скритний та стійкий до контрзаходів моніторинг підводного й надводного середовища без демаскуючого випромінювання. Додатковими перевагами є знижена вразливість до кібератак на електромагнітні системи, зокрема атак типу DDoS на супутникові мережі, можливість функціонування в умовах електромагнітного деніалу, а також забезпечення довготривалого моніторингу з мінімальними енергетичними витратами, що відзначається у звіті CyberPeace Institute «Cyber Dimensions of a Hybrid Warfare» (2025) [3].

Таким чином, у зазначених умовах SOFAR може розглядатися як ефективна альтернативна або додаткова технологія в системі SAR, що дозволяє реалізувати акустичне позиціонування та виявлення об'єктів без ризиків, притаманних електромагнітним каналам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідроакустичний канал SOFAR у сучасних дослідженнях розглядається як ефективний інструмент далекодистанційного виявлення та локалізації джерел акустичних сигналів, зокрема вибухів і руйнувань, шляхом реєстрації низькочастотних імпульсів, що поширюються на великі відстані з мінімальними втратами енергії. Використання мереж гідрофонів дозволяє з високою точністю визначати координати джерел акустичних сигналів методом триангуляції. В умовах гібридної війни це набуває критичного значення для атрибуції скритних актів саботажу, коли відсутні візуальні або електромагнітні сліди. До ключових переваг SOFAR відносять пасивний характер спостереження (без активного зондування середовища), стійкість до перешкод та високу просторову точність локалізації.

Прикладом практичного застосування принципів дії SOFAR у сучасних умовах є виявлення координат підривів газопроводів Nord Stream 1 та Nord Stream 2 26 вересня 2022 року. Як зазначається в публікації Nord Stream Attacks [4], донні сейсмічні та гідроакустичні станції, розташовані на території Данії, Швеції, Німеччини, Фінляндії та Норвегії, зафіксували акустичні сигнали вибухів і дозволили визначити їхні координати навіть за відсутності прямих візуальних підтверджень [4].

Важливо зазначити, що принципи SOFAR традиційно застосовувалися для виявлення аварій підводних човнів за акустичними ознаками руйнування корпусу або вибухів, сигнали яких поширюються на тисячі кілометрів і локалізуються за допомогою гідрофонних мереж. У контексті перспектив розвитку цивільних підводних вантажних суден, зокрема для арктичних маршрутів і транспортування скрапленого природного газу (LNG), значення SOFAR істотно зростає. Автономні підводні фрахтові системи (наприклад, концепції на основі переосмислення платформ класу Turphoon) потребують стійкого позиціонування в умовах льодового покриву, де електромагнітні засоби навігації є ненадійними. При цьому низький тиск на корпус для неглибокого занурення підвищує ризики аварій, що робить можливість швидкого акустичного виявлення місця інциденту за допомогою SOFAR критично важливим.

Історично канал SOFAR активно застосовувався в пошуково-рятувальних операціях на морі (SAR), зокрема для гідроакустичного визначення координат місця аварії літаків і суден у період Другої світової війни. Як зазначено в огляді [5], система передбачала автоматизований скид спеціальних вибухових пристроїв (SOFAR bombs — заряди масою близько 4 фунтів TNT), які занурювалися до глибини осі каналу (приблизно 1000–1500 м) і детонували, створюючи низькочастотний акустичний імпульс [5]. Завдяки рефракції звуку в шарі мінімальної швидкості поширення, сигнал розповсюджувався на тисячі кілометрів з мінімальними втратами енергії. Берегові гідрофонні станції, зокрема на Бермудських островах і Барбадосі, фіксували азимут приходу сигналу, що дозволяло методом триангуляції визначити координати місця вибуху (аварії) та оперативно спрямовувати рятувальні сили в умовах ненадійного радіозв'язку. Розгортання систем SOFAR в інтересах SAR потребувало інвестицій у створення мережі берегових гідрофонних станцій. У цей період (Другої світової війни) ВМС США фінансували відповідні програми в межах проєктів протичовнової боротьби та рятування, з бюджетами на акустичні дослідження, які в сучасних оцінках досягають десятків мільйонів доларів. Подальший розвиток цих технологій привів до створення системи SOSUS, витрати на яку вже обчислювалися мільярдами доларів, хоча первинні SAR-рішення на основі SOFAR залишалися відносно економічними завдяки використанню простих зарядних пристроїв і наявної гідрофонної інфраструктури [6].

Незважаючи на доведену ефективність, активне використання SOFAR у SAR було поступово згорнуте внаслідок появи більш оперативних і зручних технологій, зокрема радіомаяків ELT/EPIRB та супутникових систем COSPAS-SARSAT, які забезпечують майже реальний час і високу точність. Починаючи з 1950-х років, основний фокус застосування принципів SOFAR змістився у військову сферу, передусім для виявлення підводних човнів, хоча гідрофонні мережі продовжували функціонувати в пасивному режимі.

На сучасному етапі канал SOFAR не використовується в стандартних SAR-операціях, які спираються на супутникові системи, радіомаяки (406 МГц), безпілотні платформи та алгоритми штучного інтелекту. Водночас його принципи знаходять застосування в нішевих сценаріях, зокрема під час аналізу акустичних сигналів пінджерів бортових самописців літаків (пошуки рейсів MH370 або Air France 447), а також у постінцидентних розслідуваннях із використанням пасивних гідрофонних мереж, таких як СТВТО або колишні елементи SOSUS.

Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Принцип дії SOFAR ґрунтується на використанні шару океану з мінімальною швидкістю звуку, в якому низькочастотні акустичні хвилі поширюються з найменшими втратами енергії. Сучасні дослідження вказують на можливість інтеграції цих принципів у донні мережеві системи підводного акустичного зв'язку, що використовують гідроакустичні модеми-ретранслятори [7], а також у системи акустичного позиціонування з використанням пінджерів [8].

Донні мережі, розміщені на океанському дні, здатні виконувати функції, аналогічні SOFAR, зокрема далекодістанційне виявлення сигналів, пасивне спостереження та точне позиціонування. Їх архітектура передбачає використання фіксованих вузлів (гідрофонів, акустичних модемів, пінджерів), з'єднаних кабельними або бездротовими ретрансляторами, з передачею даних на берегові станції або обробкою в реальному часі. Такі мережі не лише відтворюють принципи SOFAR, але й перевершують класичні системи за рахунок адаптивності та програмної обробки сигналів, включно з алгоритмами штучного інтелекту (наприклад, у фреймворках SUNSET або DESERT), що дозволяє здійснювати локалізацію місця аварії в реальному часі [9].

Однак, канал SOFAR є природним утворенням, яке можна і слід використати в SAR-операціях на морі в сучасних складних умовах гібридної війни. Але тут слід зауважити, що наразі невирішеним залишається питання фізичної природи формування та стабільності існування у часі і просторі хвилеводу SOFAR в умовах просторово-часової мінливості океанографічних параметрів. На рисунку 1 наведено схему поширення звуку в хвилеводі SOFAR, де звукові хвилі, що виходять

від джерела, заломлюються в область із меншою швидкістю звуку, «захоплюючи» енергію сигналу в межах каналу [10].

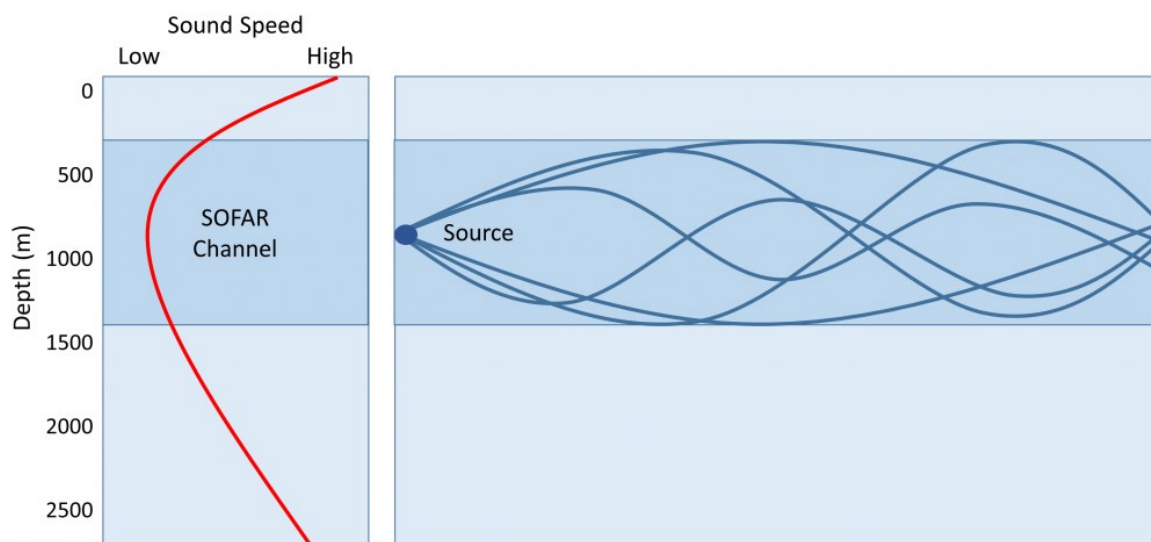


Рисунок 2 - Схема поширення звуку в каналі SOFAR [10].

Розглянемо проблему невизначеності фізичної природи формування гідроакустичного хвилеводу SOFAR, адже відсутність коректної фізичної моделі формування цього гідроакустичного хвилеводу не дозволяє однозначно пояснити причини його різної ефективності в різних океанічних басейнах, зокрема в Індійському, Тихому та Атлантичному океанах. Як підтвердження цієї невизначеності наведемо усереднені значення основних океанологічних параметрів у шарі осі хвилеводу SOFAR для зазначених океанів.

Таблиця 1 — Усереднені значення океанологічних параметрів на осі гідроакустичного хвилеводу SOFAR у трьох океанах

Океан	Глибина осі SOFAR, м	Температура, °C	Солоність, г/кг	Щільність, кг/м ³	Швидкість звуку на осі, м/с
Тихий (центральний)	1050–1150	3,3–3,8	34,55–34,62	1027,78 – 1027,88	1482 – 1484
Індійський	1150–1350	2,3–3,0	34,60–34,70	1028,05 – 1028,18	1479 – 1482
Атлантичний	1100–1300	3,8–4,8	34,85–35,00	1027,95 – 1028,15	1484 – 1488

Згідно з наведеними даними, найбільш сприятливі умови для формування та функціонування хвилеводу SOFAR спостерігаються в Індійському океані, де фіксується мінімальне значення швидкості звуку (≈ 1479 м/с). Друге місце за ефективністю займає Тихий океан (мінімум ≈ 1482 м/с). Найменш сприятливі умови виявлено в Атлантичному океані, де швидкість звуку на осі хвилеводу досягає максимальних значень (до 1488 м/с), що погіршує умови акустичного захоплення та дальність поширення сигналів.

Другим критичним проявом невизначеності фізичної природи SOFAR є його обмежена географія. Зокрема, у Чорному та Середземному морях на глибинах 1000–1200 м мінімум швидкості звуку не формується, внаслідок чого глибоководний гідроакустичний хвилевод SOFAR у цих морських басейнах відсутній з причин, що досі не мають однозначного фізичного пояснення.

Так, у Чорному морі, починаючи з глибини приблизно 70 м, швидкість звуку з глибиною монотонно зростає в середньому приблизно від 1450 м/с на глибині 200 м до 1550 м/с поблизу дна. У Середземному морі вертикальна структура швидкості звуку є складнішою, проте результат аналогічний: глибоководний мінімум швидкості звуку, характерний для океанічного SOFAR-каналу, не формується.

Таблиця 2 — Порівняння океанологічних умов на глибині 1000 м в різних акваторіях

Параметр	Світовий океан	Чорне море	Середземне море
Температура, °C	2–5	~9	13–14
Зміна температури з глибиною	~0	~0	~0
Солоність, ‰	~34,7	~22,5	~38,6
Зміна солоності з глибиною	~0	~0	~0
Мінімум швидкості звуку	Так	Ні	Ні

Отже, у Чорному та Середземному морях на глибинах близьких до 1000 м відсутній мінімум швидкості звуку, незважаючи на те, що, як і в океані, вертикальні градієнти температури та солоності на цих глибинах є практично відсутніми, а гідростатичний тиск монотонно зростає з глибиною. Це суперечить класичним уявленням про механізм формування SOFAR-каналу та вказує на неповноту наявної фізичної моделі. У зв'язку з цим, у межах дослідження виконано критичний огляд сучасних уявлень щодо фізики формування глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR.

Загальноприйнятим є підхід, згідно з яким мінімум швидкості звуку на глибинах приблизно 1000 м формується внаслідок зростання гідростатичного тиску, що підвищує швидкість звуку, за умов, коли вплив вертикальних градієнтів температури та солоності на швидкість звуку стає незначним [10]. На рис. 2 наведено схематичне зображення профілів температури та тиску як факторів формування мінімуму швидкості звуку. Відповідно до класичних уявлень та рисунку, швидкість звуку є максимальною поблизу поверхні океану внаслідок високих температур, а також на великих глибинах через домінуючий вплив високого гідростатичного тиску, тоді як між цими зонами формується шар мінімальної швидкості звуку - вісь SOFAR-каналу [10].

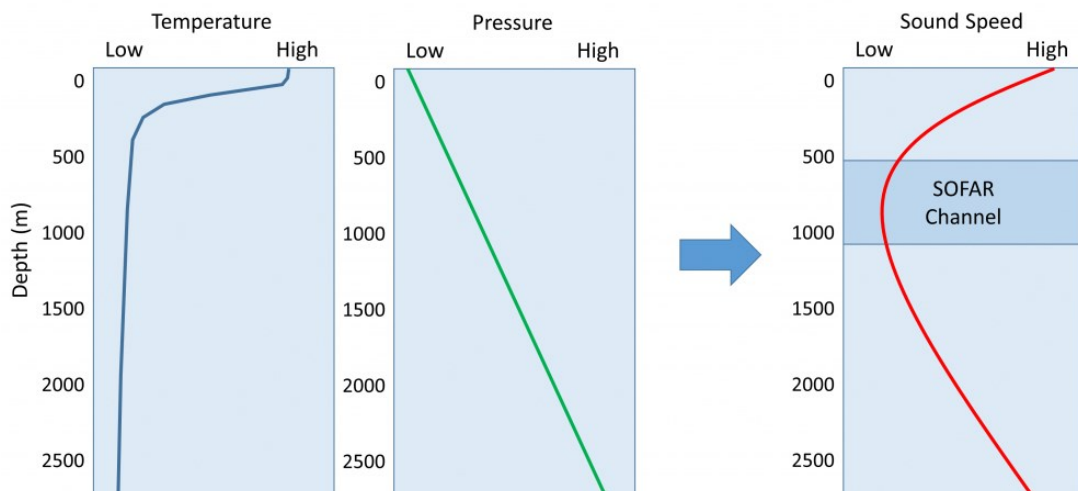


Рисунок 2 - Типові профілі змін температури, тиску та швидкості звуку з глибиною [10].

Таким чином констатується, що у верхньому шарі океану (орієнтовно 0–800 м) домінує зниження температури води з глибиною, яке є основною причиною зменшення швидкості звуку. Нижче головного океанського термоклину вплив температури на зменшення швидкості звуку поступово слабшає, тоді як вплив гідростатичного тиску, що зростає з глибиною, стає домінуючим і зумовлює збільшення швидкості звуку. У шарі, де від’ємний температурний градієнт повністю компенсується додатним градієнтом тиску, формується мінімум швидкості звуку, який інтерпретується як вісь гідроакустичного хвилеводу (зазвичай на глибинах близьких до 1000 м). Отже, загальноприйнята концепція стверджує, що на глибинах, де істотні зміни температури й солоності вже відсутні, саме зростання гідростатичного тиску є тим фактором, який змушує швидкість звуку знову зростати з глибиною, створюючи мінімум швидкості звуку - хвилевід SOFAR [10]. Наведемо результати розрахунків та проведемо аналіз утворення типового SOFAR у тропічній зоні центральної частини Тихого океану.

Таблиця 3 — Результати розрахунків типового SOFAR у тропічній зоні центральної частини Тихого океану

Глибина, м	Тиск, дбар	T, °C	Швидкість звуку, м/с	Густина ρ , кг/м ³
700	710	7,2	1498	1026,9
1100 (SOFAR)	1120	3,8	1483	1027,8
1500	1520	2,7	1492	1028,3
2000	2030	1,9	1510	1029,1
4000	4070	1,4	1568	1031,1

Проаналізуємо зміни температури та щільності води вище і нижче осі SOFAR. Вище осі SOFAR (від 700 м до 1100 м) температура знижується на 3,4 °C, тоді як густина води зростає на 0,9 кг/м³ (1026,9 → 1027,8 кг/м³). Нижче осі SOFAR (від 1100 м до 4000 м) температура знижується лише на 2,4 °C (3,8 → 1,4 °C), а густина продовжує зростати плавно і монотонно (1027,8 → 1031,1 кг/м³). Таким чином, на глибині осі SOFAR у розрахункових даних не спостерігається стрибкоподібної зміни чи різкого зростання густини води, що б свідчило на вплив тиску на підвищення швидкості звуку.

Узагальнення даних вертикальних профілів CTD/Argo (з урахуванням того, що густина ρ розраховується за стандартними рівняннями стану морської води) демонструє такі типові закономірності:

- густина води на глибині шару SOFAR змінюється (зростає) плавно та монотонно з глибиною як вище, так і нижче мінімуму швидкості звуку;
- типовий градієнт густини в шарі 800–1500 м становить приблизно $+0,15 \div 0,30$ кг/м³ на 100 м;
- на глибині осі SOFAR не фіксується пікнометричних «стрибків» або локального прискорення зростання щільності.

Отже, нами показано, що формування мінімуму (від’ємного екстремуму) швидкості звуку в шарі гідроакустичного хвилеводу SOFAR у Світовому океані відбувається в умовах, коли вертикальні градієнти T, S, і ρ не мають інверсій — тобто сам мінімум швидкості звуку виникає не внаслідок “аномалій” або “переломів” у профілях основних параметрів, а в межах монотонних однонаправлених змін характеристик водної товщі.

Для подальшого аналізу і пошуку причин формування мінімуму швидкості звуку в шарі гідроакустичного хвилеводу SOFAR здається доцільним розглянути існуючу суперечність між теоретичною та емпіричною гідроакустикою.

У межах теоретичної гідроакустики відповідно до формули Ньютона—Лапласа швидкість звуку визначається фундаментальними фізичними властивостями середовища: модулем об’ємної пружності (K - опір стисканню) та густиною (ρ - інерційна характеристика маси). Однак у «емпіричній» гідроакустиці швидкість звуку зазвичай обчислюють за формулами такого вигляду:

$$C = f(T, S, P), \quad (1)$$

де аргументами виступають температура (T), солоність (S) та тиск (P) (або глибина z), тобто параметри, які не є причинами змін швидкості звуку, а фактично наслідками впливу термодинамічного стану та складу морської води на пружність та густину морської води. У цьому сенсі має місце методологічна «підміна причин наслідками», що історично зумовлено обмеженнями прямих вимірювань. Наприклад, густину води можна точно визначати інструментально тільки у лабораторних умовах, а модуль об'ємної пружності *in situ* теж практично не вимірюється. Саме тому емпіричні рівняння швидкості звуку використовують T , S , P як доступні для вимірювання «аргументи», а K і ρ залишаються «прихованими» у структурі коефіцієнтів емпіричних рівнянь швидкості звуку.

Важливо враховувати, що сучасні емпіричні рівняння для розрахунку швидкості звуку в морській воді (Del Grosso 1974, Mackenzie 1981, Coppens 1965/1981, UNESCO/Chen–Millero–Li 1987, TEOS-10 2010) фактично є поліноміальними апроксимаціями змін швидкості звуку, отриманих емпірично в певних умовах змін температури, тиску та солоності. А фундаментальна фізична причина — надмолекулярна структура води, міжмолекулярні взаємодії неявно проявлені в коефіцієнтах апроксимації швидкості звуку. У зв'язку з цим емпіричні формули містять перехресні та нелінійні члени (наприклад, $P \cdot T$, $P \cdot T^2$, $P^2 \cdot T$ тощо), які і формалізують приховані нелінійні зв'язки між функцією C та аргументами T , S , P . Принципово важливо, що саме ці нелінійні та перехресні члени в рівняннях забезпечують появу мінімуму швидкості звуку на глибинах 1000–1300 м. Як практичну ілюстрацію цьому можна зазначити: якщо в рівняннях типу Del Grosso або Chen–Millero–Li вилучити перехресні члени (тобто, звести залежності до суто лінійних), то за $T \approx 3^\circ\text{C}$ швидкість звуку починає зростати вже з 300–400 м, а канал SOFAR, як мінімум швидкості звуку, не проявляється у розрахунках за визначенням. Це вказує, що «просте пояснення» механізму формування SOFAR як компенсації двох монотонних градієнтів - слабкого від температури та сильного від тиску - є надмірним спрощенням і не відображає дійсної природи процесу.

Враховуючи зазначене, виникають наукові підстави для критичного перегляду твердження про причину утворення глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR: «Вважається загальновизначеним, що мінімум швидкості звуку в хвилеводі SOFAR на глибинах ≈ 1000 – 1200 м утворюється завдяки зростанню гідростатичного тиску, який збільшує швидкість звуку, в умовах, коли вертикальний градієнт температури і солоності стає не впливовим на процес формування мінімальних значень швидкості звуку» [10].

Постановка задачі та її розв'язання. У результаті виконаного дослідження вперше запропоновано фізичну модель гідроакустичного хвилеводу SOFAR, яка базується на універсальній для усіх речовин теорії швидкості звуку Ньютона-Лапласа, та додатково враховує специфічні властивості водного середовища, пов'язані з його надмолекулярною структурною організацією.

Формула Ньютона-Лапласа:

$$C = \sqrt{(K / \rho)}, \quad (2)$$

де C — швидкість звуку;

K — адіабатичний модуль об'ємної пружності речовини;

ρ — густина речовини.

Запропонований підхід дозволяє поєднати фундаментальні фізичні причини поширення звуку (модуль об'ємної пружності та густину) з особливостями води як асоційованої рідини, що не враховуються в класичних гідроакустичних моделях.

Вирішенню задачі пояснення механізму формування глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR сприяло обґрунтування доцільності включення до алгоритму обчислення швидкості звуку у воді, поряд із пружністю та густиною, параметрів, що описують зміну надмолекулярної структури води. Показано, що за досягнення критичних значень гідростатичного тиску на глибинах близьких чи дещо понад 1 км відбуваються структурні перебудови водного середовища, які досі не були явно враховані в рамках класичної гідроакустичної теорії. Наявність критичного впливу тиску на руйнування або трансформацію структурованості води підтверджується результатами сучасних експериментальних досліджень, зокрема роботами, що присвячені можливості існування рідинно-рідинної критичної точки у воді [11].

У першому наближенні для врахування структурних ефектів води в запропонованій фізичній моделі пропонується використовувати загальновідому аномалію щільності прісної води за температури 3,98 °С. Зазначена аномалія полягає в тому, що максимальна щільність води досягається не за температури кристалізації, як у більшості речовин, а за температури близької до 3,98 °С. За подальшого охолодження нижче цієї температури щільність води зменшується, що є наслідком формування просторово розвинених водневих зв'язків і кластерних структур. Саме наявність водневих зв'язків, характерних лише для води серед поширених природних рідин, зумовлює її унікальні термодинамічні та акустичні властивості (рисунок 3).

Запропонований підхід дозволяє розглядати формування мінімуму швидкості звуку в шарі SOFAR не як результат компенсації монотонних градієнтів температури та тиску, а як наслідок глибинних змін мікро- та надмолекулярної структури води під дією високого гідростатичного тиску за певних температур (близьких до температури максимальної щільності прісної води). Це створює підґрунтя для побудови узгодженої фізичної моделі гідроакустичного хвилеводу SOFAR, яка поєднує класичні положення теорії акустики з сучасними уявленнями про структурну організацію водного середовища.

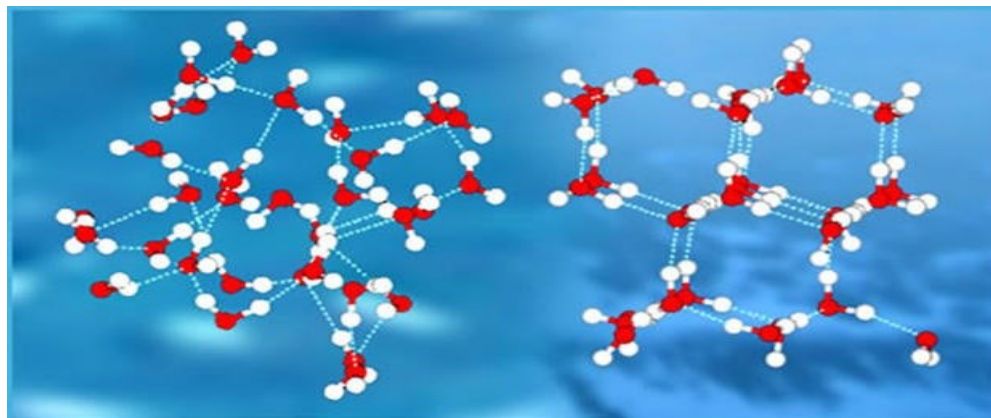


Рисунок 3 - Структурованість води у рідкому (ліворуч) та кристалізованому (праворуч) станах [12].

Зі зниженням температури води від 3,98 °С вплив водневих зв'язків істотно зростає внаслідок зменшення температури як міри середньої кінетичної енергії теплового руху молекул. У водному середовищі починає формуватися тетрадральна квазіструктура, близька за конфігурацією до структури льоду. Це призводить до збільшення середньої міжмолекулярної відстані та, відповідно, до складних і неочевидних змін фундаментальних фізичних властивостей води — модуля об'ємної пружності (опору стисканню) та густини (інерційної характеристики маси), як основних параметрів, що визначають швидкість звуку. Важливо підкреслити наявність принципової фізичної невизначеності: за таких умов об'єм води збільшується приблизно на 0,012 %, тобто маса фіксованого об'єму зменшується. Водночас унаслідок формування надмолекулярної

структурованості зростає маса кластерів води: тетраедральні кластери мають відносну молекулярну масу близько 108 (як міру інерції), на відміну від відносної молекулярної маси окремої молекули води, яка дорівнює 18. Гіпотетично, якщо припустити незмінність модуля об'ємної пружності, швидкість звуку в «мережі» таких кластерів була б приблизно у 2,45 рази меншою, ніж у цьому ж об'ємі, але у мономолекулярному середовищі.

З іншого боку, виникнення структурованості впливає і на модуль об'ємної пружності води. Гіпотетично, не враховуючи змін густини але враховуючи лише зміну пружності, швидкість звуку могла б зменшитися приблизно на 5,1 %, що відповідає зниженню на ~75–80 м/с.

Таким чином, реальний вплив змін структурованості водного середовища на швидкість звуку визначається взаємодією двох факторів — зміни густини та зміни модуля об'ємної пружності, причому їх сумарний ефект не може бути однозначно передбачений у межах класичних емпіричних моделей. За умов невизначеності фактичного внеску змін пружності та густини у формування швидкості звуку в морській воді за температур, близьких до кристалізації та максимальної щільності (характерних для умов утворення глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR), доцільно розглянути спрощений варіант аналізу його формування. Розглянемо зміни модуля об'ємної пружності (K) та густини (ρ) на глибинах 800–1500 м, тобто, без прямого врахування структурних перетворень води.

У Світовому океані на глибинах 800–1200 м мінімальні температури води перебувають у діапазоні 2,3–3,8 °С. У цьому температурному інтервалі модуль об'ємної пружності виявляє максимальну чутливість до температурних змін ($\partial K/\partial T \approx 2,2\text{--}2,5$ МПа/°С). Це означає, що зниження температури лише на 0,1 °С призводить до зменшення K приблизно на 0,23 МПа, що є істотним. Водночас зростання гідростатичного тиску призводить до збільшення модуля об'ємної пружності приблизно на +16,5 МПа на кожні 1000 м глибини. Вважається, що щільність води на цих глибинах за даних температур перебуває поблизу свого максимуму і змінюється значно повільніше.

Таким чином, у діапазоні глибин 800–1200 м модуль об'ємної пружності починає швидко зменшуватися, і відповідно до формули Ньютона—Лапласа, швидкість звуку досягає мінімуму саме на глибині осі SOFAR. Наведене узагальнення підтверджується розрахунками, виконаними на основі реального вертикального профілю океанологічних даних у центральній частині Тихого океану (вимірювання Argo № 5904460, 2023 рік, таблиця 4).

Таблиця 4 – Вертикальний розподіл океанологічних параметрів та розрахункових характеристик

Глибина, м	Тиск, дбар	T, °С	Солоність, psu	c (вимір), м/с	ρ , кг/м ³	K (розрах.), ГПа
800	810	5,85	34,62	1494,8	1027,125	2,2945
900	912	4,92	34,61	1489,8	1027,395	2,2790
1000	1014	4,17	34,60	1486,2	1027,625	2,2678
1100	1116	3,65	34,59	1484,9	1027,805	2,2628
1200	1218	3,25	34,59	1485,8	1027,975	2,2655
1500	1523	2,61	34,58	1492,1	1028,455	2,2820
2000	2030	2,05	34,57	1507,8	1029,185	2,3365
4000	4070	1,41	34,55	1568,2	1031,420	2,5365

Розрахунки за формулою Ньютона—Лапласа свідчать, що на глибині осі гідроакустичного хвилеводу SOFAR (1100 м) модуль об'ємної пружності K досягає абсолютного мінімуму (2,2628 ГПа). Вище осі SOFAR (800–1100 м) зменшення K ($\Delta K = -0,0317$ ГПа) та зростання густини ($\Delta \rho = +0,68$ кг/м³), призводить до зниження швидкості звуку. Нижче осі SOFAR (1100–1400 м) модуль

об'ємної пружності навпаки, зростає ($\Delta K = +0,0137$ ГПа), як і густина; однак, густина зростає значно повільніше, ніж вище осі ($\Delta \rho = +0,49$ кг/м³), унаслідок чого швидкість звуку починає поволі зростати.

Отже, у повній відповідності до фундаментальної формули Ньютона—Лапласа (у першому наближенні), мінімум швидкості звуку в шарі гідроакустичного хвилеводу SOFAR зумовлений локальним мінімумом модуля об'ємної пружності води, а не безпосередньо зростанням гідростатичного тиску, як це прийнято в класичній інтерпретації [10].

Новизна виконаного дослідження полягає в обґрунтуванні того, що сучасна гідроакустика, яка базується переважно на емпіричних рівняннях швидкості звуку, не враховує фундаментального механізму формування глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR, пов'язаного з трансформацією тетраедральної структурованості води та колапсом кластерів під дією критичних значень тиску. У роботах [13, 14, 15] показано, що за температур нижче 4 °C і тиску до ~10 МПа вода демонструє посилену тетраедральну структурованість, підтверджену сучасними методами і засобами вимірювань, яка з підвищенням тиску зазнає флуктуацій і поступового руйнування. За таких умов пружність води зменшується, оскільки тетраедральні кластери з порожнинами роблять середовище «м'якшим». Таким чином, у наслідок одночасного зменшення модуля об'ємної пружності та аномалії максимуму густини в морській воді за температури нижче ~4 °C обидва фактори діють в одному напрямі і зменшують швидкість звуку. Отже, можна констатувати, що саме зміна структури води направлено впливає на її пружність та густина, що формує мінімум швидкості звуку, який лежить в основі акустичного каналу SOFAR.

Однак, на глибинах більше 1100 м тенденція зміни швидкості звуку різко змінюється на протилежну – швидкість звуку починає зростати. Очевидно, що відбулися не поступові а практично моментальні якісні структурні перетворення. Швидкість звуку зростає, бо холодна глибинна вода під більшим тиском стає більш пружно-жорсткою, наближаючись за акустичними властивостями до твердого стану звичайної речовини, яка вже майже не має структури за рахунок водневих зв'язків, і реагує на поступове збільшення тиску відповідним поступовим збільшенням опору – пружність зростає. Отже існують концептуальні підстави для того, що вода під сильним стиском різко набуває властивостей, ближчих до щільно упакованих (мало структурованих) станів. Частково це підтверджується молекулярно-динамічними моделями та експериментальними даними [16].

Було вирішено спробувати дослідити похибки емпіричних рівнянь, на прикладі розрахунку адіабатичного модуля об'ємної пружності, з застосуванням факторного методу аналізу. Для тестових розрахунків методом факторного аналізу було обрано шість варіантів ідентичних умов (ідеалізований океан, повністю перемішаний до дна), які відрізнялися лише температурою води. Діапазон температур охоплював значення від 2 °C до 7 °C (максимальна температура, за якої зафіксовано формування гідроакустичного хвилеводу SOFAR). За класичними уявленнями гідроакустики результати розрахунків вертикального розподілу адіабатичного модуля об'ємної пружності повинні підпорядковуватися єдиним загальним тенденціям. Водночас добре відома аномалія густини прісної води поблизу 4 °C свідчить про існування процесів структурної перебудови, які стандартними гідроакустичними підходами не враховуються.

Перший результат розрахунків показав, що для води з температурою 2 °C та для води з температурами 3–7 °C тенденції зміни другої похідної модуля об'ємної пружності за глибиною (K'') є кількісно різними (таблиця 5). Отже, емпіричне рівняння адіабатичного модуля об'ємної пружності, побудоване з використанням формул Chen–Millero (для швидкості звуку c) та UNESCO EOS-80 (для густини води ρ) за солоності $S = 35$ psu, демонструє неочікувані розбіжності у вертикальному розподілі K'' для температур нижче та вище 2 °C.

Таблиця 5 - Друга похідна модуля об'ємної пружності (K'') за глибиною для шести температурних варіантів

Глибина, м	K'' (2 °C)	K'' (3 °C)	K'' (4 °C)	K'' (5 °C)	K'' (6 °C)	K'' (7 °C)
500	-60	-74	-81	-86	-92	-97
600	-53	-66	-74	-79	-85	-90
700	-47	-60	-68	-73	-79	-84
800	-40	-56	-61	-67	-73	-78
900	-35	-49	-56	-62	-68	-73
1000	-29	-43	-50	-56	-62	-67
1100	-24	-38	-44	-51	-57	-62
1200	-19	-33	-40	-46	-52	-58
1300	-14	-29	-36	-42	-48	-54
1400	-10	-25	-32	-38	-44	-50
1500	-5	-21	-28	-34	-41	-47
1600	-1	-17	-25	-31	-37	-43
1700	3	-14	-21	-28	-34	-40
1800	6	-10	-18	-25	-31	-37
1900	10	-7	-15	-22	-28	-34
2000	13	-4	-12	-19	-26	-32

У ході аналізу було встановлено специфічну закономірність: для температури 2 °C (і нижче) та для температур 3 °C (і вище) характер зміни другої похідної модуля об'ємної пружності з глибиною належить до різних класів поведінки, що вказує на зміну режиму розрахункової залежності.

Для узагальнення результатів було обчислено середню різницю значень K'' між температурними парами (таблиця 6). Аналіз показав, що значення +14,67 Pa/m² для пари температур 2–3 °C у 4,0–4,2 рази перевищує середнє значення ~3,52 Pa/m², характерне для інших температурних пар у діапазоні 3–7 °C. Величини ~3,47–3,54 Pa/m² є практично однаковими (відхилення не перевищують 2 %), що свідчить про спільний, однаковий за природою розрахунковий механізм зміни модуля об'ємної пружності в цьому температурному інтервалі. Особливо показовим є інтервал температур ≥ 4 –7 °C, де відхилення між парами не перевищують 0,0004 %.

Таблиця 6 - Середня різниця другої похідної модуля об'ємної пружності води (K'') між температурними парами

Пара температур, °C	Середня різниця K'' , Pa/m ²
2 – 3	+14,67
3 – 4	+3,47
4 – 5	+3,53
5 – 6	+3,54
6 – 7	+3,53

Таким чином, значення 14,67 Pa/m² для пари 2–3 °C інтерпретується не як реальна фізична властивість води, а як прояв аномального режиму роботи емпіричної формули, що пов'язаний із домінуванням структурних ефектів (водневі зв'язки, тетраедральна та надмолекулярна впорядкованість), які у використаних рівняннях не параметризовані. Натомість значення ~3,5 Pa/m² відповідає звичайному термодинамічному режиму, в якому емпіричні залежності працюють коректно.

Різниця масштабів (~400 %) свідчить про те, що в температурному інтервалі 2–3 °С емпірична формула переходить у якісно інший режим похибок

Другий результат факторного аналізу вказує на існування критичного діапазону тиску, що відповідає глибинам близьким до 800–900 м, де фіксуються максимальні відхилення між інтерпольованими та розрахованими за формулою значеннями K'' (таблиця 7). Саме на цій глибині проявляються екстремальні розбіжності, що не можуть бути пояснені гладкою апроксимацією.

Таблиця 7 - Різниця (фактичне – інтерпольоване значення) для K''

Глибина, м	2 °С (Па/м ²)	3 °С (Па/м ²)	4 °С (Па/м ²)	5 °С (Па/м ²)	6 °С (Па/м ²)	7 °С (Па/м ²)
600	0,06	-0,17	0,06	0,02	0,02	-0,02
700	-0,29	0,69	-0,30	-0,09	-0,09	0,01
800	0,50	-0,91	0,57	0,23	0,23	0,20
900	-0,39	0,23	-0,40	-0,30	-0,30	-0,43
1000	0,12	0,37	-0,17	0,23	0,23	0,20
1100	-0,02	-0,18	0,45	-0,09	-0,09	0,21
1200	0,03	-0,09	-0,27	0,02	0,02	-0,24
1300	-0,01	0,05	0,06	-0,00	0,00	0,07

Подальше порівняння середніх значень різниці (розраховане – інтерпольоване) на інших глибинах (600–1300 м, за винятком 800 м) зі значенням на глибині 800 м показало, що за абсолютною величиною відхилення є статистично значущими для температур $T = 2-4$ °С (0,571–1,039 Па/м²), тоді як для температур $T = 5-7$ °С відхилення стабільно менші (0,230–0,262 Па/м²) і відрізняються як за середнім значенням, так і за дисперсією (таблиця 8).

Таблиця 8 - Відхилення K'' на глибині 800 м відносно середнього на інших глибинах

Температура, °С	Середнє K'' на 7-ми глибинах (без глибини 800 м), Па/м ²	($K''_{800} - K''_{\text{середнє}}$), Па/м ²
2	-0,071	0,571
3	0,129	-1,039
4	-0,072	0,642
5	-0,032	0,262
6	-0,032	0,262
7	-0,030	0,230

Це свідчить про існування різних режимів похибок емпіричних рівнянь у діапазоні низьких температур (2–4 °С) та вищих температур (5–7 °С), що узгоджується з гіпотезою про чутливість структурних ефектів води до тиску та температури в областях, близьких до температур замерзання та максимальної густини прісної води. Отже, виявлені аномалії слід трактувати не як особливості реальної пружності води, а як обмеження застосовності емпіричних формул, у яких параметр структурованості води відсутній.

Висновки. Встановлено, що міжнародна система пошуку і порятунку (SAR), орієнтована переважно на електромагнітні та супутникові канали зв'язку і позиціонування (COSPAS-SARSAT, GMDSS), є вразливою в умовах війни нового гібридного типу, коли застосовуються засоби радіоелектронної боротьби, спуфінгу та електромагнітного деніалу. Це створює критичні ризики для безпеки морського транспорту, підводної інфраструктури та судноплавних маршрутів.

Обґрунтовано доцільність трансформації системи SAR у напрямі інтеграції гідроакустичних засобів спостереження та позиціонування, зокрема на основі невразливого гідроакустичного хвилеводу SOFAR. Застосування SOFAR дозволяє забезпечити пасивне (скритне) та стійке до контрзаходів виявлення аварій, вибухів і руйнувань, що є принципово важливим для морського транспорту в умовах анонімних диверсій і втрати зв'язку.

Показано, що загальноприйнята інтерпретація формування хвилеводу SOFAR як простої компенсації температурного градієнту, який практично відсутній на цих глибинах, та градієнту тиску за глибиною, який постійний у всьому діапазоні глибин, є методично неповною і не пояснює ані різну ефективність SOFAR в океанах, ані його відсутність у Чорному та Середземному морях. Це обмежує можливості прогнозування ефективності акустичних засобів SAR на конкретних ділянках морських акваторій.

Запропоновано фізичну інтерпретацію процесу формування SOFAR-каналу на основі фундаментальної теорії Ньютона-Лапласа, відповідно до якої мінімум швидкості звуку на осі хвилеводу зумовлений локальним мінімумом адиабатичного модуля об'ємної пружності води, а не безпосередньо зростанням гідростатичного тиску. Такий підхід узгоджується з результатами розрахунків за реальними океанологічними профілями (Argo) і дозволяє фізично коректно інтерпретувати умови утворення хвилеводу. Показано, що структурованість води за температур, близьких до ~ 4 °C призводить до зменшення модуля об'ємної пружності та збереження тенденції аномалії максимуму густини, внаслідок чого обидва фактори діють узгоджено у напрямі зменшення швидкості звуку. Подальша різка зміна тенденції зменшення модуля об'ємної пружності на його збільшення та ослаблення аномалії максимуму густини призводить до зміни тенденції і швидкості звуку – швидкість звуку починає зростати. Саме цей механізм швидкої (практично моментальної) перебудови структури водних зв'язків створює фізичну основу для формування глибоководного акустичного каналу SOFAR, придатного для наддалекого поширення акустичних сигналів у системі SAR.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання раніше невідомих фізичних принципів формування глибоководного акустичного каналу SOFAR для розроблення та модернізації систем SAR морського транспорту, зокрема шляхом створення пасивних донних гідроакустичних мереж, як резервного або автономного каналу пошуку, локалізації аварій та забезпечення безпеки судноплавства в умовах світової війни нового гібридного типу.

ЛІТЕРАТУРА

1. The Primakov, Not Gerasimov, Doctrine in Action // Carnegie Endowment for International Peace. 2019. URL: <https://carnegieendowment.org/research/2019/06/the-primakov-not-gerasimov-doctrine-in-action> (дата звернення: 02.01.2026).
2. How the Baltic Sea nations have tackled suspicious cable cuts // Atlantic Council. URL: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/how-the-baltic-sea-nations-have-tackled-suspicious-cable-cuts/> (дата звернення: 02.01.2026).
3. Cyber Dimensions of a Hybrid Warfare // CyberPeace Institute. URL: <https://cyberpeaceinstitute.org/news/cyber-dimensions-of-a-hybrid-warfare/> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Nord Stream attacks highlight vulnerability of undersea pipelines in west // The Guardian. 2022. URL: <https://www.theguardian.com/business/2022/sep/29/nord-stream-attacks-highlight-vulnerability-undersea-pipelines-west> (дата звернення: 10.01.2026).
5. History of the SOFAR Channel // Discovery of Sound in the Sea. 2022. URL: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (дата звернення: 20.01.2026).
6. History of the SOFAR Channel. URL: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (дата звернення: 20.01.2026).
7. SOSUS: The “Secret Weapon” of Undersea Surveillance // Undersea Warfare. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1864574> (дата звернення: 20.01.2026).
8. Underwater Acoustic Communications: Design Considerations // Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://stuff.mit.edu/people/millitsa/resources/pdfs/garmisch.pdf.pdf> (дата звернення: 1.02.2026).
9. Software-defined underwater acoustic networks // Florida Atlantic University. URL: <https://www.fau.edu/engineering/directory/faculty/sklivanitis/personal/underwatermag15.pdf> (дата звернення: 02.02.2026).
10. Sound // Roger Williams University. URL: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/6-4-sound/> (дата звернення: 10.02.2026).
11. Experimental tests for a liquid-liquid critical point in water. URL: https://www.researchgate.net/publication/345810643_Experimental_tests_for_a_liquid-liquid_critical_point_in_water (дата звернення: 10.02.2026).

12. Nature up close: Water, and life as we know it // CBS News. URL: <https://www.cbsnews.com/news/nature-up-close-water-and-life-as-we-know-it-judy-lehmborg/> (дата звернення: 22.02.2026).
13. Signatures of a liquid–liquid transition in an ab initio deep neural network model for water // Proceedings of the National Academy of Sciences. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2015440117> (дата звернення: 22.02.2026).
14. Molecular structure and dynamics of liquid water. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:854642/FULLTEXT03.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).
15. The anomalies and criticality of liquid water. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7959589/> (дата звернення: 25.02.2026).
16. Microheterogeneity in Liquid Water Associated with Hydrogen-Bond Cooperativity: IR Spectroscopic and MD Simulation Study of Temperature Effect. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/26/11/5187#:~:text=Water%20is%20the%20most%20common,acceptor%20character%20of%20water%20molecules.> (дата звернення: 25.02.2026).

REFERENCES

1. Carnegie Endowment for International Peace (2019). *The Primakov, Not Gerasimov, Doctrine in Action*. Available at: <https://carnegieendowment.org/research/2019/06/the-primakov-not-gerasimov-doctrine-in-action> (accessed: 02 January 2026).
2. Atlantic Council. (n.d.). *How the Baltic Sea nations have tackled suspicious cable cuts*. Available at: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/how-the-baltic-sea-nations-have-tackled-suspicious-cable-cuts/> (accessed: 02 January 2026).
3. CyberPeace Institute. (n.d.). *Cyber Dimensions of a Hybrid Warfare*. Available at: <https://cyberpeaceinstitute.org/news/cyber-dimensions-of-a-hybrid-warfare/> (accessed: 10 January 2026).
4. The Guardian. (2022). *Nord Stream attacks highlight vulnerability of undersea pipelines in west*. Available at: <https://www.theguardian.com/business/2022/sep/29/nord-stream-attacks-highlight-vulnerability-undersea-pipelines-west> (accessed: 10 January 2026).
5. Discovery of Sound in the Sea. (2022). *History of the SOFAR Channel*. Available at: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (accessed: 20 January 2026).
6. Discovery of Sound in the Sea. (n.d.). *History of the SOFAR Channel*. Available at: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (accessed: 20 January 2026).
7. Undersea Warfare. (n.d.). *SOSUS: The “Secret Weapon” of Undersea Surveillance*. Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1864574> (accessed: 20 January 2026).
8. Massachusetts Institute of Technology. (n.d.). *Underwater Acoustic Communications: Design Considerations*. Available at: <https://stuff.mit.edu/people/millitsa/resources/pdfs/garmisch.pdf.pdf> (accessed: 1 February 2026).
9. Florida Atlantic University. (n.d.). *Software-defined underwater acoustic networks*. Available at: <https://www.fau.edu/engineering/directory/faculty/sklivanitis/personal/underwatermag15.pdf> (accessed: 02 February 2026).
10. Roger Williams University. (n.d.). *Sound*. Available at: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/6-4-sound/> (accessed: 10 February 2026).
11. ResearchGate. (n.d.). *Experimental tests for a liquid-liquid critical point in water*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/345810643_Experimental_tests_for_a_liquid-liquid_critical_point_in_water (accessed: 10 February 2026).
12. CBS News. (n.d.). *Nature up close: Water, and life as we know it*. Available at: <https://www.cbsnews.com/news/nature-up-close-water-and-life-as-we-know-it-judy-lehmborg/> (accessed: 22 February 2026).
13. Proceedings of the National Academy of Sciences. (n.d.). *Signatures of a liquid–liquid transition in an ab initio deep neural network model for water*. Available at: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2015440117> (accessed: 22 February 2026).
14. Diva Portal. (n.d.). *Molecular structure and dynamics of liquid water*. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:854642/FULLTEXT03.pdf> (accessed: 25 February 2026).
15. PubMed Central. (n.d.). *The anomalies and criticality of liquid water*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7959589/> (accessed: 25 February 2026).
16. MDPI. (n.d.). *Microheterogeneity in Liquid Water Associated with Hydrogen-Bond Cooperativity: IR Spectroscopic and MD Simulation Study of Temperature Effect*. Available at: <https://www.mdpi.com/1422->

[0067/26/11/5187#:~:text=Water%20is%20the%20most%20common,acceptor%20character%20of%20water%20molecules](#) (accessed: 25 February 2026).

Kucherenko N. V., Kapochkina M. B

WAYS OF TRANSFORMATION OF THE INTERNATIONAL SYSTEM OF SEARCH AND RESCUE AT SEA IN THE CONDITIONS OF THE THIRD WORLD WAR OF THE NEW HYBRID TYPE (SAR)

The international search and rescue (SAR) system in maritime transport traditionally relies on electromagnetic and satellite communication and positioning channels COSPAS-SARSAT, GMDSS, the effectiveness of which in a new hybrid type of war is reduced due to electronic warfare, spoofing and other forms of electromagnetic weapons. The article substantiates the directions of SAR transformation, which are associated with a return to hydroacoustic means of monitoring and positioning disaster sites based on the SOFAR waveguide as a channel resistant to electromagnetic influences and suitable for covert attribution of underwater incidents critical for the safety of shipping and underwater infrastructure. It is shown that empirical hydroacoustics does not allow explaining the spatial variability of SOFAR efficiency, as well as its practical absence in the Black and Mediterranean Seas, which has direct consequences for future routes and logistics of maritime transport, taking into account the risks of modern SAR. A physical interpretation of the formation of SOFAR is proposed based on the Newton-Laplace theory with an emphasis on the role of water elasticity and structural effects inherent exclusively to the aquatic environment. The results obtained form the scientific basis for the integration of passive bottom and network hydroacoustic systems in SAR of maritime transport as a backup/backup circuit in conditions of hybrid warfare: risks of sabotage, accidents and loss of communication.

Keywords: *maritime transport; search and rescue (SAR); underwater infrastructure; SOFAR hydroacoustic waveguide; water structure; speed of sound, hybrid warfare.*

Стаття прийнята 03.03.2025