



INFLUENȚA ACIDIFICĂRII OCEANICE ASUPRA ACȚIUNILOR SUBMARINE

Comandor (rtr.) conf. univ. dr. Romeo BOȘNEAGU

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța
DOI: 10.55535/GMR.2025.2.13

Ocean acidification, driven by increased carbon dioxide concentration in the atmosphere, generates significant chemical changes in the marine environment, with direct effects on submarine operations. The paper analyzes the impact of lowering oceanic pH on sound propagation, sonar performance, strength of materials used in submarine construction and reliability of communication systems. Related operational risks such as damage to acoustic equipment, reduced detection and identification accuracy, and increased vulnerabilities in surveillance and navigation missions are highlighted. These issues highlight the need to adapt underwater tactics and technology to keep operations efficient in ever-changing environmental conditions.

Future research directions are also proposed for advanced acidified environment modeling, development of innovative materials and optimization of acoustic communications. It is essential to create predictive models integrating oceanographic and chemical variables to anticipate pH and other relevant parameters developments so that operational strategies can be planned and adjusted in real time. The research results underline the importance of continuous monitoring of oceanographic parameters and a proactive approach to maintaining the efficiency and safety of submarine operations in the context of global climate change.

Keywords: ocean acidification; oceanographic parameters; submarine warfare; industrial processes; marine ecosystems;

INTRODUCERE

Procesul de acidificare a apelor oceanice nu mai poate fi considerat doar un subiect de natură strict științifică, ci a devenit o realitate operațională, cu implicații directe asupra activităților maritime și a strategiilor de securitate navală. Această schimbare a mediului marin influențează în mod semnificativ echipamentele, tehnicile și operațiunile desfășurate pe mare, impunând adaptări și măsuri specifice pentru a răspunde noilor provocări generate de dezechilibrul chimic al oceanelor. Forțele navale trebuie să anticipeze consecințele acestui fenomen, adoptând o abordare proactivă în dezvoltarea și modernizarea capacităților submarine. Integrarea datelor chimice în planificarea și execuția misiunilor devine, astfel, o condiție esențială pentru menținerea superiorității strategice submarine în deceniile următoare.

În același timp, acidificarea oceanelor constituie o provocare majoră nu doar pentru biodiversitatea marină, ci și pentru desfășurarea acțiunilor submarine. Modificările chimice ale apei de mare influențează propagarea sunetului și performanța sonarului, rezistența materialelor utilizate în construcția submarinelor, precum și fiabilitatea comunicațiilor. Aceste efecte vor transforma fundamental tehnologiile utilizate atât în domeniul civil (explorare, comunicații, cercetare), cât și în cel militar (navigație submarină, supraveghere, luptă submarină).

Acidificarea oceanelor reprezintă scăderea treptată a pH-ului apei marine pe perioade extinse de timp, proces determinat, în principal, de absorbția bioxidului de carbon (CO_2) din atmosferă. În urma dizolvării CO_2 în apa oceanică, au loc reacții chimice care cresc concentrația ionilor de hidrogen (H^+), ducând la acidificarea apei și la diminuarea concentrației ionilor de carbonat, esențiali pentru formarea cochiliilor și scheletelor calcificate ale organismelor marine (oceanservice.noaa.gov, 2025).

De la începutul *revoluției industriale* (aproximativ 1750), oceanele au absorbit între o treime și jumătate din emisiile totale de CO_2

Acidificarea oceanelor constituie o provocare majoră nu doar pentru biodiversitatea marină, ci și pentru desfășurarea acțiunilor submarine. Modificările chimice ale apei de mare influențează propagarea sunetului și performanța sonarului, rezistența materialelor utilizate în construcția submarinelor, precum și fiabilitatea comunicațiilor.



Fără rolul de absorbant al oceanelor, nivelurile atmosferice de CO₂ ar fi fost mult mai ridicate, ceea ce ar fi amplificat efectele încălzirii globale, precum creșterea nivelului mării, modificarea tiparelor climatice și intensificarea fenomenelor meteorologice extreme. Totuși, această capacitate de absorbție provoacă modificări chimice majore în ecosistemele marine.

antropogen, determinând o scădere a pH-ului oceanic de la aproximativ 8,19 la 8,05, ceea ce echivalează cu o creștere de 30% a acidității (www.britannica.com). Acidificarea oceanelor este rezultatul emisiilor antropice ridicate de CO₂ provenite din activități precum transportul, procesele industriale și practicile agricole

Nivelurile atmosferice de CO₂ au crescut de la circa 280 părți pe milion (ppm) înainte de industrializare la aproape 400 ppm în prezent, rata de creștere accelerându-se semnificativ. Actualmente, aproximativ 50% din CO₂ antropogen se regăsește în primii 400 m ai oceanului, cu infiltrări progresive în straturile adânci. În regiunile de larg, schimbările chimice la adâncime vor apărea cu o întârziere de câteva secole față de suprafață.

Deși încălzirea globală și acidificarea oceanelor sunt fenomene distincte, ambele au aceeași cauză primară – creșterea emisiilor de CO₂. În prezent, potrivit unor studii britanice, concentrația atmosferică de CO₂ este cea mai ridicată din ultimii 800.000 de ani, posibil chiar din ultimele 20 de milioane de ani (www.britannica.com).

Fără rolul de absorbant al oceanelor, nivelurile atmosferice de CO₂ ar fi fost mult mai ridicate, ceea ce ar fi amplificat efectele încălzirii globale, precum creșterea nivelului mării, modificarea tiparelor climatice și intensificarea fenomenelor meteorologice extreme. Totuși, această capacitate de absorbție provoacă modificări chimice majore în ecosistemele marine.

DATE ȘI METODE

Conform datelor disponibile, emisiile globale de CO₂ din combustibili fosili și industrie au atins 37,01 miliarde tone metrice în 2023 și 37,41 miliarde tone metrice în 2024 (lb.). Începând cu anii '90, emisiile globale au crescut cu peste 60% (tabelul 1, figura 1).

Tabelul 1: Emisiile globale de CO₂ în perioada 1940-2024, în miliarde tone metrice (www.statista.com)

Anul	CO ₂ (miliarde tm)	Anul	CO ₂ (miliarde tm)
1940	4,84	1983	18,99
1941	4,97	1984	19,64
1942	4,96	1985	20,31
1943	5,04	1986	20,61

Anul	CO ₂ (miliarde tm)	Anul	CO ₂ (miliarde tm)
1944	5,12	1987	21,25
1945	4,26	1988	22,08
1946	4,65	1989	22,38
1947	5,15	1990	22,52
1948	5,42	1991	22,97
1949	5,18	1992	22,31
1950	5,93	1993	22,52
1951	6,38	1994	22,74
1952	6,47	1995	23,27
1953	6,65	1996	23,99
1954	6,79	1997	24,12
1955	7,44	1998	24,02
1956	7,93	1999	24,56
1957	8,19	2000	25,20
1958	8,42	2001	25,39
1959	8,85	2002	25,95
1960	9,39	2003	27,31
1961	9,41	2004	28,25
1962	9,75	2005	29,21
1963	10,27	2006	30,18
1964	10,82	2007	31,06
1965	11,31	2008	31,58
1966	11,86	2009	31,02
1967	12,24	2010	31,81
1968	12,90	2011	33,91
1969	13,76	2012	34,38
1970	14,90	2013	34,72
1971	15,50	2014	34,77
1972	16,22	2015	34,72
1973	17,08	2016	34,73
1974	17,01	2017	35,29
1975	17,05	2018	36,00
1976	17,99	2019	36,37





Anul	CO ₂ (miliarde tm)	Anul	CO ₂ (miliarde tm)
1977	18,48	2020	34,37
1978	19,06	2021	36,02
1979	19,60	2022	36,50
1980	19,48	2023	37,01
1981	19,02	2024	37,41
1982	18,87	-	-

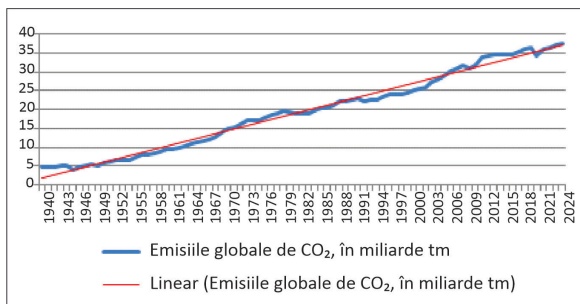


Figura 1: Evoluția emisiilor globale de CO între 1940 și 2024 (lb.)

Pentru a reconstrui chimia oceanelor în trecut, cercetătorii folosesc analiza cochiliilor fosile sau a carotelor de gheață din Groenlanda și Antarctica. Aceste metode indică faptul că nivelurile actuale de CO₂ și scăderea pH-ului nu au precedent în ultimii 800.000 de ani.

Evenimente istorice, precum maximul termal de la granița Paleocen (epoca inferioară a paleogenului, caracterizată prin apariția faunei de numuliți, lamelibranhiate, gasteropode, mamifere etc., care a început acum 66 de milioane de ani și s-a încheiat acum 56 de milioane de ani) – Eocen (epocă geologică cuprinsă în prima parte a perioadei paleogene, caracterizată mai ales prin existența numuliților, lamelibranhiatelor, gasteropodelor, echinidelor și mamiferelor, de acum 55,8 ± 0,2 milioane de ani, până acum 33,9 ± 0,1 milioane de ani), când eliberări masive de CO₂ au avut loc pe parcursul a mii de ani, relevă că ritmul actual de acidificare este fără precedent, ca rapiditate (www.britannica.com).

În mod natural, apa de mare are un pH de aproximativ 8,2; de la *revoluția industrială*, această valoare a scăzut la aproximativ 8,05

(tabelul 2, figura 2), echivalent cu o creștere a acidității de 26% (www.statista.com).

Studiile efectuate asupra Oceanului Pacific de Nord în perioada 1998-2002 confirmă tendințele de acidificare progresivă (Garcia-Ibanez, 2016, p. 3711). Acidificarea oceanelor se intensifică în combinație cu schimbările climatice și alți factori de stres, de mediu, necesitănd luarea în considerare a efectelor lor combinate (Falkenberg, 2020, pp. 169, 179-180, 184-185).

Tabelul 2: Valoarea medie a pH-ului oceanic în perioada 1985-2022 (www.statista.com)

Anul	Valoarea PH mediu – oceanul planetar
1985	8,11
1990	8,1
1995	8,1
2000	8,09
2005	8,08
2010	8,07
2015	8,06
2020	8,05
2021	8,05
2022	8,05

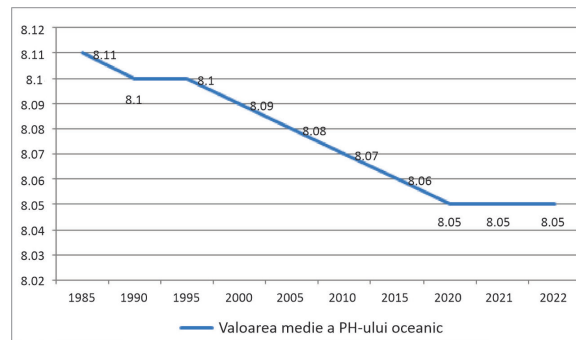


Figura 2: Evoluția valorii medii a pH-ului oceanic 1985-2022 (lb.)





REZULTATE ȘI DISCUȚII

Acidificarea oceanelor afectează direct organismele calcificatoare – corali, moluște, fitoplancton și zooplancton –, elemente cheie în lanțul trofic marin. Principalele efecte constau în: corodarea structurilor calcificate, ca urmare a scăderii pH-ului; reducerea disponibilității ionilor de carbonat, necesari formării cochiliilor și scheletelor; accelerarea fenomenului de acidificare, care are loc de 30-100 de ori mai rapid decât în epocile geologice anterioare.

Modelele climatice propuse de Grupul Interguvernamental privind Schimbările Climatice /IPCC prevăd că nivelurile atmosferice de CO₂ ar putea atinge 500 ppm până în 2050 și 800 ppm până la sfârșitul secolului, ducând la o scădere suplimentară a pH-ului oceanic cu 0,3-0,4 unități (IPCC, 2019). În condiții extreme, apele din regiunile arctice și antarctice ar deveni subsaturate cu aragonit, provocând corodarea rapidă a cochiliilor organismelor marine sensibile, precum pteropodele (Feely et al., 2004, pp. 10-12). De asemenea, modificările chimiei oceanice afectează și comportamentul organismelor non-calcificatoare: de exemplu, percepția prădătorilor de către unele specii de pești poate fi alterată în ape mai acide.

Acidificarea nu afectează doar apele oceanelor, ci și estuarele și zonele costiere. Studiile asupra Curentului subpolar Nord Atlantic (North Atlantic Sub Polar Gyre/NASPG), între 2009 și 2019, arată o absorbție crescută de carbon antropogen și accelerarea acidificării în această regiune.

De asemenea, acidificarea oceanelor afectează ecosistemele marine și influențează semnificativ și desfășurarea acțiunilor submarine, atât civile, cât și militare. Aceasta are implicații asupra:

- propagării undelor acustice submarine;
- performanței sonarului;
- durabilității materialelor utilizate în construcția navelor și submarinelor;
- sistemelor de comunicații și navigație (Theocharidis et al., 2025, pp. 1, 17-19).

În mediul subacvatic, comunicațiile, detectarea și navigația se bazează, în mare măsură, pe propagarea undelor acustice. Acidificarea oceanelor modifică proprietățile acustice ale apei de mare, în special

prin reducerea coeficientului de absorbție sonoră. Studii recente indică faptul că scăderea pH-ului determină o reducere a absorbției acustice pentru frecvențele joase (sub 10 kHz) (Hester et al., 2008). Aceasta înseamnă că sunetele de frecvență joasă pot călători pe distanțe mai mari în oceanele acidificate. Aceste modificări au implicații duale: pe de o parte, avantaje pentru comunicațiile submarine pe distanțe lungi și pentru detectarea la mare distanță, pe de altă parte, dezavantaje în ceea ce privește confidențialitatea operațiunilor militare subacvatice, deoarece semnalele acustice vor putea fi detectate de la distanțe mai mari.

Modelările efectuate de Departamentul de Energie al SUA arată că o scădere a pH-ului oceanic cu 0,3 unități poate crește distanța de propagare a sunetului cu până la 70% în unele regiuni (Seghal et al., 2010). Modificarea pH-ului influențează absorbția sunetului, reducând atenuarea acustică în frecvențele joase, ceea ce poate afecta detectarea submarinelor și eficiența sonarului.

Sonarele active și pasive sunt afectate de schimbările în atenuarea sunetului și de alterarea profilurilor de temperatură și salinitate. Pe măsură ce pH-ul scade, sonarele pasive ar putea detecta zgomote de la distanțe mai mari. În același timp, sonarele active vor beneficia de o transmisie îmbunătățită a impulsurilor sonore, dar și de o complexificare a interpretării ecourilor, din cauza zgomotului de fond crescut. Mai mult, modificările chimice ale apei pot afecta caracteristicile stratului de refracție acustică, esențial pentru operațiunile de ascundere (stealth) ale submarinelor (Office of Naval Research, 2021).

În ceea ce privește sistemele de camuflaj și semnătura acustică, modificările în propagarea sunetului pot altera modul în care sunt percepute semnăturile acustice ale navelor, afectând strategiile de camuflaj și contramăsuri.

Pentru navigația submarină interesează, între altele, variația densității apei, care depinde de salinitate și temperatură. Pe latitudini medii, creșterea temperaturii aerului și a apei oceanului influențează densitatea, astfel că, în stratul de suprafață, variabil (în funcție de anotimp și de condițiile meteo-oceanografice specifice), vor fi temperaturi ridicate și omogene, după care urmează stratul de salt al temperaturii, mai rece, cu intensitatea maximă la sfârșitul verii, și care



Sonarele active și pasive sunt afectate de schimbările în atenuarea sunetului și de alterarea profilurilor de temperatură și salinitate. Pe măsură ce pH-ul scade, sonarele pasive ar putea detecta zgomote de la distanțe mai mari.

Acidificarea oceanelor afectează ecosistemele marine și influențează semnificativ și desfășurarea acțiunilor submarine, atât civile, cât și militare. Aceasta are implicații asupra: propagării undelor acustice submarine; performanței sonarului; durabilității materialelor utilizate în construcția navelor și submarinelor; sistemelor de comunicații și navigație.



dispare odată cu răcirea vremii și începerea amestecului convectiv în straturile mai adânci. Stratul de salt al temperaturii induce și apariția statutului de salt al densității apei de mare, adică creșterea mare a densității pe verticală, într-un strat de apă relativ subțire (Boșneagu, 2019). Stratul de salt al densității apei de mare a cărui densitate este suficientă pentru a susține un submersibil fără mișcare se numește „fund lichid” (figura 3).

Condiția de flotabilitate pe fundul lichid este următoarea:

$$\sigma_t V - D = 0 \quad (1)$$

unde: (σ_t) este densitatea apei de mare; V – volumul submersibilului în imersiune; D – greutatea submersibilului.

Mentținerea submersibilului pe fundul lichid se face prin manevra apei de balast (balastare – debalastare) și a instalației de guvernare. Pentru a avea fund lichid, este necesar ca, odată cu creșterea imersiunii, fără mărirea greutății submersibilului, flotabilitatea acestuia să devină pozitivă. Pentru realizarea acestei condiții trebuie ca densitatea stratului de apă imediat inferior să fie mai mare. Prin măsurarea valorilor temperaturii și a densității straturilor de apă la diferite adâncimi se pot determina existența fundului lichid, limitele și capacitatea lui de susținere.

Determinarea fundului lichid se poate face prin relația:

$$q = (\sigma_{tz} - \sigma_{t0}) - (t_0 - t_z) \beta_t 10^3 - K_z 10^3 \quad (2)$$

unde: q este capacitatea de susținere a fundului lichid, în kg la o tonă deplasament; $(\sigma_{tz} - \sigma_{t0})$ – diferența de densitate la suprafață și la adâncimea z , în unități convenționale; $(t_0 - t_z)$ – diferența de temperatură la suprafață și la adâncimea z ; β_t – coeficientul termic de contracție de volum al oțelului corpului submersibilului, valoarea sa medie este 0,000036; K – coeficientul de comprimare de volum al corpului, propriu fiecărui submersibil, $K_{mediu} = 0,00005$

Primul membru al părții din dreapta a relației caracterizează creșterea flotabilității ca urmare a creșterii densității apei cu creșterea adâncimii, iar următorii doi, pierderea de flotabilitate ca urmare a scăderii temperaturii și a creșterii presiunii apei.

Acidificarea oceanului poate accelera degradarea materialelor expuse mediului marin, astfel: coroziunea oțelurilor și aliajelor folosite în construcția submarinelor și vehiculelor subacvatice este favorizată

de scăderea pH-ului; materialele compozite și acoperirile de protecție se pot deteriora mai rapid în medii mai acide, necesitând tehnologii noi pentru protecție; structurile fixe (cablu submarin, sonde de explorare, stații de comunicații) sunt expuse unui risc crescut de degradare prematură (Xia, 2024; Yang, 2024). Acidificarea accelerează coroziunea echipamentelor metalice și a componentelor navale, crescând nevoia de mentenanță și reducând durata de viață a infrastructurii. Această situație impune investiții suplimentare în dezvoltarea de materiale rezistente la aciditate crescută, cu proprietăți anticoroziune îmbunătățite.

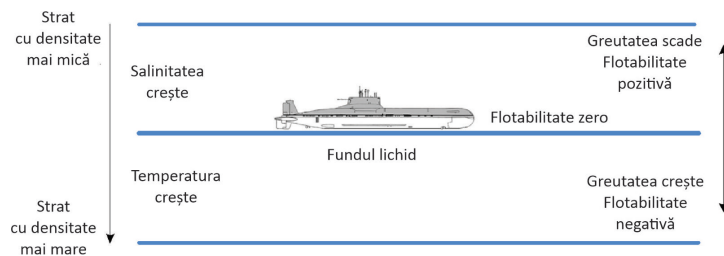


Figura 3: Submarin pe fundul lichid – schiță de principiu (concepția autorului)

Schimbările de propagare acustică afectează sistemele de comunicații submarine (spre exemplu, comunicațiile dintre submarine sau dintre stații fixe și vehicule autonome subacvatice/ AUVs). Acestea trebuie adaptate la noile condiții: recalibrarea frecvențelor de lucru; optimizarea semnalelor pentru a evita pierderile cauzate de zgomotul de fond crescut; integrarea de tehnologii alternative, cum ar fi comunicațiile optice sau electromagnetice subacvatice pentru distanțe scurte.

Pentru a răspunde provocărilor induse de acidificarea oceanelor, domeniul acțiunilor submarine propune o serie de măsuri adaptative, precum:

- dezvoltarea de sonare inteligente, capabile să interpreteze date acustice complexe în medii cu zgomot variabil;
- utilizarea de materiale inovatoare rezistente la coroziune în proiectarea navelor și a echipamentelor subacvatice;





O analiză longitudinală a acidificării oceanice indică o creștere constantă a concentrației de CO₂ dizolvat în apă, cu o scădere progresivă a pH-ului oceanelor în ultimele decenii. Prin inducție, putem observa că acest proces influențează caracteristicile fizico-chimice ale apei, cum ar fi solubilitatea sunetului și reacțiile galvanice care accelerează degradarea materialelor.

- adaptarea tacticilor de navigație și detecție în funcție de noile profile acustice ale oceanelor;
- promovarea cercetării interdisciplinare pentru monitorizarea continuă a acidificării și modelarea impactului asupra operațiunilor submarine.

În acest context, este esențială adaptarea continuă la noile condiții impuse de schimbările chimice ale mediului subacvatic. Succesul acestei adaptări depinde atât de inovarea materialelor și a sistemelor electronice, dezvoltarea de noi modele de propagare acustică adaptate la condițiile acidificate, cât și de consolidarea cooperării internaționale în monitorizarea impactului acidificării asupra securității maritime.

Pentru a aborda provocările identificate, considerăm oportune următoarele direcții de cercetare:

- modelarea avansată a propagării acustice în oceane acidificate pentru a anticipa modificările performanței sonarului și comunicațiilor;
- dezvoltarea de noi materiale compozite rezistente la coroziune accelerată de scăderea pH-ului marin;
- optimizarea sistemelor de comunicații acustice prin adaptarea frecvențelor și algoritmilor de codare la noile condiții de propagare;
- evaluarea riscurilor operaționale generate de creșterea detectabilității sonarului pasiv în scenarii tactice;
- monitorizarea continuă și integrarea datelor oceanografice (pH, temperatură, salinitate) în sistemele de planificare a misiunilor submarine.

Afectarea ecosistemelor va duce la scăderea biodiversității marine, care, la rândul său, poate influența desfășurarea exercițiilor militare în anumite zone, din rațiuni ecologice sau geopolitice.

O analiză longitudinală a acidificării oceanice indică o creștere constantă a concentrației de CO₂ dizolvat în apă, cu o scădere progresivă a pH-ului oceanelor în ultimele decenii. Prin inducție, putem observa că acest proces influențează caracteristicile fizico-chimice ale apei, cum ar fi solubilitatea sunetului și reacțiile galvanice care accelerează degradarea materialelor. Deducțiile din aceste observații sugerează

că operațiunile submarine devin mai expuse la riscuri tehnice și tactice, cum ar fi: degradarea rapidă a echipamentelor, alterarea performanței sonarului pasiv/activ și creșterea vulnerabilității față de detecție.

CONCLUZII

Acidificarea oceanică, determinată de creșterea absorbției de dioxid de carbon (CO₂) din atmosferă în apa de mare, are implicații semnificative asupra domeniului militar, în special asupra operațiunilor navale și submarine. Această modificare a chimiei marine afectează fiabilitatea echipamentelor sensibile și performanța senzorilor acustici utilizați în detectarea submarinelor. Modificările asupra propagării sunetului prin apa de mare duc la schimbări în atenuarea sunetului la frecvențe specifice, ce trebuie exploatate pentru recalibrarea senzorilor, a sonarului și a sistemelor de contramăsuri.

Ecosistemele marine afectate pot modifica rutele strategice și desfășurarea operațiunilor în anumite regiuni. Noi strategii operaționale vor analiza dacă zonele marine care suferă o acidificare intensă ar putea deveni fie mai propice, fie mai vulnerabile pentru desfășurarea operațiunilor submarine, necesitând reevaluări constante ale hărților acustice și ale strategiilor de navigație submarină.

Acidificarea afectează negativ eficiența și durabilitatea capacităților submarine. Este necesară, în acest context, adaptarea strategiilor de proiectare și mentenanță pentru navele și echipamentele submarine. Se impune dezvoltarea unor noi materiale rezistente la coroziune și adaptarea senzorilor la noile condiții chimice ale mediului marin. Coroziunea accelerată reduce durata de exploatare a submarinelor și vehiculelor subacvatice autonome (AUV), impunând investiții în aliaje rezistente la aciditate sau sisteme de protecție avansate (ex. acoperiri nanotehnologice anticoroziive). Mentenanța predictivă va trebui să integreze datele chimice despre acidificare în algoritmi specifici, pentru a preîntâmpina defecțiuni ale sistemelor și a reduce costurile de întreținere.

Potențiale contribuții la eficientizarea acțiunilor militare în condiții chimice schimbate ale apelor oceanice ar putea fi: dezvoltarea unei rețele de monitorizare chimică oceanică dedicată sprijinirii aplicațiilor navale; utilizarea modelelor predictive pentru adaptarea designului



GÂNDIREA
MILITARĂ
ROMÂNEASCĂ

Ecosistemele marine afectate pot modifica rutele strategice și desfășurarea operațiunilor în anumite regiuni. Noi strategii operaționale vor analiza dacă zonele marine care suferă o acidificare intensă ar putea deveni fie mai propice, fie mai vulnerabile pentru desfășurarea operațiunilor submarine, necesitând reevaluări constante ale hărților acustice și ale strategiilor de navigație submarină.



noilor echipamente navale; crearea unor parteneriate între institutele de cercetare marină și industria de apărare pentru inovație tehnologică dual-use.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE:

1. Boșneagu, R. (2019). *Oceanografie pentru navigator*. Constanța: Editura EX PONTO.
2. Falkenberg, L.J. (2020) *Ocean Acidification and Human Health*, <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/12/4563>, pp. 169, 179-180, 184-185.
3. Feely, R.A. et al. (2004). *Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans*, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15256664/>, pp. 10-12.
4. Garcia-Ibanez, M.I. et al. (2016). *Ocean acidification in the subpolar North Atlantic: Rates and mechanisms controlling pH changes*, https://www.researchgate.net/publication/304365710_Ocean_acidification_in_the_subpolar_North_Atlantic_Rates_and_mechanisms_controlling_pH_changes, pp. 3701, 3709-3712.
5. Hester, K.C. et al. (2008). *Unanticipated consequences of ocean acidification: A noisier ocean at lower pH*, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GL034913>, pp. 2-4, accesat la 22 iunie 2025.
6. IPCC (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
7. ONR (Office of Naval Research) (2021). *Naval Strategies for an Acidifying Ocean*.
8. Seghal, A. et al. (2010). *Effects of Climate Change and Anthropogenic Ocean Acidification on Underwater Acoustic Communications*, www.researchgate.net/profile/Anuj-Sehgal-4/publication/224182953_Effects_of_climate_change_and_anthropogenic_ocean_acidification_on_underwater_acoustic_communications/links/0c96051b303f55656c000000/Effects-of-climate-change-and-anthropogenic-ocean-acidification-on-underwater-acoustic-communications.pdf, p. 4, accesat la 12 mai 2025.
9. Theocharidis, T., Kavallieratou, E. (2025). *Underwater communication technologies: a review*, *Telecommunication Systems* 88:54, <https://doi.org/10.1007/s11235-025-01279-x>, pp. 1, 17-19.
10. Urlick, R.J. (1983). *Principles of Underwater Sound*, ediția a treia, McGraw-Hill.
11. Xia, R. (2024). *Deterioration of marine offshore structures and subsea installations subjected to severely corrosive environment: A review*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.202314050>, pp. 14-16, accesat la 22 iunie 2025.

12. Yang, J. (2024). *Marine steel corrosion prediction and zonation using feature extraction and machine learning in the seas around China*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824029871>, p. 1, accesat la 22 iunie 2025.
13. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/acidification.html>, accesat la 27 februarie 2025.
14. <https://www.britannica.com/science/ocean-acidification>, accesat la 27 februarie 2025.
15. <https://www.statista.com/statistics/1338869/average-global-ocean-ph/>, accesat la 3 martie 2025.
16. <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>, accesat la 22 iunie 2025.

