

Інформаційна стійкість системи оперативного (кризового) моніторингу морських вод

Information Resilience of the Operational (Crisis) Marine Water Monitoring System Under Military and Technogenic Threats

Андрій Залізко

Corresponding author: доктор ад'юнкт кафедри, e-mail: andreyznavy@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-5263-6897>

Andrii Zalizko

Corresponding author: PhD student, e-mail: andreyznavy@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-5263-6897>

Анатолій Нікітін

доктор філософії, доцент, професор кафедри e-mail: tolik-nikitin@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1487-0616>

Anatolii Nikitin

PhD, Associate Professor, Professor of the Department, e-mail: tolik-nikitin@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1487-0616>

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: July 26, 2026 | Revised: August 26, 2026 | Accepted: August 31, 2026

УДК 355.58: 355.424

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.31>

Мета роботи. Обґрунтування концептуального підходу та математичних положень оцінювання інформаційної стійкості системи оперативного (кризового) моніторингу морських вод в умовах воєнно-техногенних загроз.

Метод дослідження. У роботі застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних математичних методів: системний аналіз та синтез для критичного оцінювання нормативно-правової бази та формування архітектури системи з інтеграцією морських безпекажних комплексів (далі – МБЕК); математичний апарат теорії надійності для формалізації показника “інформаційної стійкості”; сценарне моделювання для аналізу поведінки запропонованого інтегрального показника за різного рівня деградації складових системи; положення теорії інформації для концептуального трактування інформаційної невизначеності в умовах дефіциту даних.

Результати. Обґрунтовано необхідність концептуальної зміни парадигми моніторингу морських вод і переходу від традиційної моделі мирного часу, орієнтованої на абсолютну повноту даних, до випереджувальної кризової моделі. Сформульовано математичну постановку, яка спрямована на мінімізацію інформаційної невизначеності. Сценарне моделювання показало необхідність залучення альтернативних захищених каналів передавання та засобів отримання даних, зокрема МБЕК, за критичної деградації цивільної системи моніторингу.

Теоретична цінність. Дослідження розширює теоретико-методологічний апарат оцінювання систем моніторингу доквілля шляхом введення критерію “інформаційної стійкості”. Сформовано концептуальну математичну базу оцінювання інформаційної стійкості на основі апарату теорії надійності, а ентропію Шеннона визначено як перспективний інструмент кількісного оцінювання інформаційної невизначеності.

Практична цінність. Запропонований підхід дозволяє оптимізувати інформаційне забезпечення органів управління Єдиної державної системи цивільного захисту (Далі – ЄДСЦЗ) [1,2], суттєво зменшуючи час на прийняття рішень щодо реагування на загрози.

Майбутні дослідження. Напрямом подальших досліджень є побудова комплексної стохастичної математичної моделі оперативного застосування та розроблення алгоритмів динамічної МБЕК в умовах воєнно-техногенних загроз.

Тип статті. Теоретична.

Purpose. Substantiation of the conceptual approach and mathematical provisions for assessing the information resilience of the system of operational (crisis) monitoring of sea waters in conditions of military and technogenic threats.

Method. The work uses a complex of general scientific and special mathematical methods: system analysis and synthesis for critical assessment of the regulatory framework and formation of the system architecture with the integration of Maritime Unmanned Systems (hereinafter referred to as UMS); mathematical apparatus of reliability theory for formalization of the “information resilience” indicator; scenario modelling to analyse the behaviour of the proposed integral indicator under different levels of degradation of the system components; and information theory principles for the conceptual interpretation of information uncertainty under data-scarcity conditions.

Findings. The need for a conceptual shift in the paradigm of marine water monitoring and a transition from the traditional peacetime model, focused on absolute data completeness, to a proactive crisis-oriented model has been substantiated. A mathematical formulation aimed at minimizing information uncertainty has been developed. Scenario modelling demonstrated the need to employ alternative secure communication channels and data acquisition tools, including Unmanned Maritime Systems (UMS), in the event of critical degradation of the civilian monitoring system.

Theoretical implications. The study expands the theoretical and methodological apparatus for evaluating environmental monitoring systems by introducing the criterion of “information resilience”. A conceptual mathematical framework for assessing information resilience based on reliability theory has been developed, while Shannon entropy is considered a prospective tool for quantifying information uncertainty.

Practical implications. The proposed approach allows you to optimize the information support of the management bodies of the Unified State System of Civil Protection (hereinafter referred to as the Unified State System of Civil Protection), significantly reducing the time for making decisions on responding to threats.

Future research. Direction for further research is construction of comprehensive stochastic mathematical model for operational application and development of dynamic routing algorithms for UMS under military and technogenic threats.

Paper type. Theoretical.

Ключові слова: система; безпека; загроза; моніторинг; ефективність; стійкість; безпекажний комплекс; невизначеність; модель.

Key words. System; Security; Threat; Monitoring; Effectiveness; Resilience; Unmanned Maritime Complex; Uncertainty; Model.

Вступ

Через збройну агресію Російської Федерації в Україну, акваторії Чорного та Азовського морів зазнали безпрецедентного деструктивного впливу, який за своїми масштабами та характером не має аналогів у сучасній європейській історії. Існуюча традиційна Державна система моніторингу довкілля [3], що сформувалась в Україні до 2022 року [4, 5], базувалась на принципах детермінованості, регулярності та повноти охоплення необхідних даних стану морського середовища. Вона розглядала екологічний моніторинг морських вод насамперед як свою складову і стабільний інструмент наукового забезпечення державної та міжнародної екологічної політики, а не як засіб для оперативного (кризового) реагування на екологічні загрози в умовах ведення тривалої війни на виснаження.

В умовах воєнного стану бойові дії в морських водах України чинять негативний вплив на морські води як каталізатор системної деградації довкілля, створення екологічних загроз для населення і територій країн Азово-Чорноморського басейну, поєднуючи механічне, хімічне та акустичне ураження довкілля морського середовища. Отже морський напрямок є вразливим для території нашої держави, і питання забезпечення екологічної безпеки морських вод України стає актуальним завданням для компетентних національних структур і відомств, а саме складовим Сил оборони держави.

Метою дослідження є обґрунтування концептуального підходу та математичних положень оцінювання інформаційної стійкості системи оперативного (кризового) моніторингу морських вод в умовах воєнно-техногенних загроз.

Огляд літератури

На сьогоднішній день науковий апарат для оцінювання ефективності функціонування системи екологічного моніторингу морських вод України є комплексним. Під час російсько-української війни він трансформувався і тепер має поєднувати традиційні еколого-математичні методи оцінки стану довкілля для мирного часу та адаптовані методи системного аналізу [6], що враховують військові загрози в умовах воєнного стану на території України.

Аналітичне забезпечення традиційно оцінювалось за рівнем акредитації лабораторій [7]. У роботах Валерія Жука [8] та Віктора Коморіна [9] детально описано застосування методів математичної статистики та моделювання екологічних трендів.

Сучасні міжнародні дослідження [10, 11] наголошують на важливості побудови стійких сенсорних мереж та зниження інформаційної невизначеності в умовах кризових ситуацій. Окремим напрямом є застосування морських автономних систем для динамічного реагування на надзвичайні ситуації [12]. Водночас можливості інтеграції таких технологій у систему оперативного моніторингу морських вод за умов воєнно-техногенних загроз потребують окремого дослідження.

Таким чином, наявні підходи достатньо повно охоплюють оцінювання екологічного стану морського середовища, статистичне опрацювання результатів спостережень та окремі питання функціонування сенсорних і автономних систем. Водночас недостатньо розробленим залишається методичний підхід до оцінювання здатності системи моніторингу зберігати інформаційну функціональність за умов втрати частини джерел даних, порушення каналів зв'язку та зниження достовірності отримуваної інформації. Це зумовлює необхідність формалізації критерію інформаційної стійкості системи оперативного (кризового) моніторингу морських вод.

Для систематизації традиційного підходу до оцінювання ефективності СЕММВ мирного часу його основні положення узагальнено за такими функціональними блоками:

1. Блок цілепокладання та нормативного забезпечення.

Порядок здійснення державного моніторингу вод [13], сформований з урахуванням положень Водної рамкової директиви ЄС (WFD) [14] та Рамкової директиви про морську стратегію (MSFD) [15], орієнтований передусім на систематичне оцінювання стану водного та морського середовища. Водночас традиційна модель моніторингу не передбачає повною мірою специфічних обмежень, пов'язаних із раптовим воєнно-техногенним впливом, фізичною недоступністю окремих районів спостереження та порушенням каналів отримання і передавання даних.

Якщо СЕММВ охоплює всі дескриптори – вона вважається ефективною.

2. Блок просторово-часового планування.

Оцінка ефективності СЕММВ базується на географічній та часовій щільності спостережень і вважається ефективною, якщо кількість станцій спостереження відповідає площі басейну річки або ділянки морської акваторії. Критерієм ефективності було дотримання визначеного Українським науковим центром екології моря (далі – УкрНЦЕМ) регламентом відбору проб, що забезпечувало формування безперервних часових проміжків для статистичного аналізу.

3. Блок лабораторно-аналітичного забезпечення.

Ефективність СЕММВ визначається через точність та сертифікацію методів вимірювань. Система оцінюється за рівнем акредитації лабораторій відповідно міжнародного стандарту ISO/IEC17025 [16] та можливістю вимірювати концентрації забруднювачів на рівні гранично допустимих концентрацій (далі – ГДК). Ефективність визначається як якість отриманих даних, що залежить від здатності їх отримання з низькою похибкою вимірювання за встановленими державними методиками [7, 13].

4. Блок інформаційного обміну.

Ефективність СЕММВ визначається за доступністю до інформаційних даних про морське довкілля для громадськості тобто оцінка того, як дані стають доступними. Критерієм є успішне функціонування “регламентів обміну даними” між Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України, Державним агентством водних ресурсів України, Міністерством охорони здоров'я України, Державною службою України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС) та іншими суб'єктами екологічного моніторингу морських вод України.

Методологія дослідження

Дослідження має теоретико-методологічний характер і ґрунтується на поєднанні системного, порівняльного та математичного підходів. Системний аналіз використано для визначення функціональних складових СЕММВ та встановлення чинників, що обмежують її функціонування в умовах воєнно-техногенних загроз. Порівняльний аналіз застосовано для зіставлення вимог до функціонування системи моніторингу в умовах мирного часу та воєнного стану. Апарат теорії надійності використано для формалізації інтегрального показника інформаційної стійкості як функції надійності критичних складових системи. Сценарне моделювання застосовано для апробації поведінки запропонованого показника за різного рівня деградації каналу зв'язку, інформаційної безпеки та валідності даних. Теоретичні положення інформаційної ентропії Шеннона використано для концептуального трактування інформаційної невизначеності; безпосереднє включення ентропійного показника до інтегрального індексу на цьому етапі дослідження не здійснювалося. Результати порівняльного аналізу основних функціональних блоків традиційної СЕММВ та обмежень, що виникають в умовах воєнного стану, узагальнено в таблиці 1.

Таблиця 1: Проблеми умов воєнного стану для методики оцінювання ефективності системи екологічного моніторингу морських вод мирного часу

Блок методики	Проблема умов воєнного стану
Цілепокладання	Необхідність забезпечення інформаційної стійкості системи та своєчасного отримання критично необхідного мінімуму верифікованих даних за умов обмеженої їх повноти.
Планування	Наукові експедиції неможливі через мінну небезпеку та блокаду виходу до моря суб'єктів екологічного моніторингу морських вод.
Лабораторії	Обмеження можливостей відбору проб у морській акваторії та проведення лабораторного аналізу в часових межах, необхідних для оперативного реагування на раптові забруднення.
Інформаційний обмін	Необхідність обмеження відкритого поширення окремих просторово-часових даних та забезпечення захищеного інформаційного обміну в умовах воєнних загроз.

Джерело: розроблено автором

Традиційна методика оцінювання розрахована на “стабільне” морське середовище, де зміна концентрацій забруднювачів відбувається поступово, унаслідок антропогенного навантаження на морське середовище. В умовах війни, коли виникає нагальна потреба у веденні оперативного (кризового) моніторингу в морських районах ведення бойових дій, ця методика демонструє критичне зниження ефективності системи.

В “мирний час”, переважно до 2022 року, концептуально склалось: ефективність самої СЕММВ не вимірювалася показниками її “живучості” чи “надійності зв'язку” і вважалася ефективною за замовчуванням, якщо вона була здатна регулярно постачати необхідні дані для розрахунку екологічних індексів та статистичних трендів. Тобто практичні обчислення зводилися не до оцінки функціонування системи, а до оцінки стану морського середовища, які традиційна система породжувала.

Спираючись на такі наукові матеріали, як дисертацію кандидата технічних наук В. Жука [8], наукової праці В. Коморіна і колективу виконавців УкрНЦЕМ щодо Базової оцінки екологічного стану морського середовища [9], ми можемо відстежити основні практичні математичні та аналітичні обчислення, які використовувалися в Україні у мирний час:

1. Санітарно-гігієнічні обчислення.

Цей підхід дістався у спадок з радянських часів і базувався на гранично допустимих концентраціях (далі – ГДК).

Традиційний розрахунок кратності перевищення забруднюючої речовини

$$K = \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1)$$

де C_i – фактична концентрація речовини у воді.

Індекс забруднення води (далі – ІЗВ): Обчислювався як середнє арифметичне перевищення ГДК для обмеженої кількості найгірших показників, один з яких, показник відносної небезпечності: $A = \frac{1}{ГДК_{ш}}$, і слід звернути увагу на те, що чим менше ГДК, тим небезпечніша речовина. Цей розрахунок досі існує в Методиці визначення збитків, заподіяних внаслідок забруднення та/або зараження (засмічення) вод, самовільного користування водними ресурсами [17].

2. Європейські інтегральні обчислення.

Починаючи з 2018 року, з дати прийняття Порядку здійснення державного моніторингу вод [13], Україна почала рахувати ефективність системи через європейські індекси. СЕММВ мала зібрати масив даних для їх обчислення і визначення індексу екологічної якості (далі – EQR (Ecological Quality Ratio)).

Головна формула європейського моніторингу морського (водного) середовища має вигляд: $EQR = \text{Фактичне значення} / \text{Референційне значення}$.

За результатами EQR водам присвоювався один з 5 класів: Відмінний, Добрий, Задовільний, Поганий, Дуже поганий.

Використання інтегральних екологічних індикаторів, зокрема індексу трофності $TRIX$ [18], дозволяє оперативно в кризовій ситуації оцінити ступінь деградації морської екосистеми в зонах гідротехнічного чи воєнного впливу на неї. Використовувався УкрНЦЕМ для вод Чорноморського басейну і обчислюється за логарифмічною формулою, що включає концентрацію хлорофілу “а”, насичення киснем, загальними фосфором та азотом.

Для комплексної оцінки деградації морських екосистем, окрім показників водної товщі на різних глибинах, доцільно враховувати стан донних утворень з використанням міжнародно визнаних бентосних індексів $AMBI$ та $M-AMBI$ [19, 20], що дозволяє фіксувати довгострокові наслідки воєнно-техногенного забруднення і є діючими сучасними математичними моделями, які оцінюють стан “здоров’я” дна за співвідношенням чутливих до забруднення та толерантних видів живих організмів.

3. Застосування Ентропії Шеннона (H) [21].

У мирний час Індекс різноманітності Шеннона (H) активно обчислювався, але він використовувався для розрахунку біорізноманіття, а не для оцінки “сліпих зон” інформації.

Формула була та сама

$$H = - \sum (p_i \times \ln p_i), \quad (2)$$

де p_i – частка особин одного виду.

Якщо видів багато – ентропія висока і це вважалося добре для морського середовища.

4. Статистичні та прогностичні обчислення.

Як описано в дисертації В. Жука, у мирний час головним інструментом оцінки були тривалі статистичні ряди:

застосуванням метода Хольта-Вінтерса [22] дозволяє адаптувати динамічні моделі до різких коливань тренду в умовах кризових ситуацій з використанням математичного апарату для прогнозування якості води, який враховує історичні дані та сезонні коливання. В умовах воєнного стану проблема полягає у структурних зламах та масових пропусках в отриманні необхідних верифікованих даних, що унеможливорює використання цього методу експоненціального згладжування;

багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз: використовувався для пошуку залежностей таких, як температура води корелює з рівнем кисню за останні 10 років;

екосистемне моделювання, наприклад, $AQUATOX$: оцінка стійкості екосистеми шельфу в праці В. Коморіна, шляхом розрахунку “базового значення екосистемного ризику” в динамічному фазовому просторі.

Результати дослідження

У мирний час функціонування СЕММВ було орієнтоване на регулярне формування масивів даних, необхідних для розрахунку EQR , $TRIX$ та застосування методів прогнозування часових рядів. Результативне використання цих підходів потребує достатньої регулярності, репрезентативності та якості вхідних даних. В умовах воєнного стану забезпечення таких характеристик істотно ускладнюється через обмеження фізичного доступу до районів акваторії та виникнення просторово-часових пропусків у спостереженнях (рисунок 1).

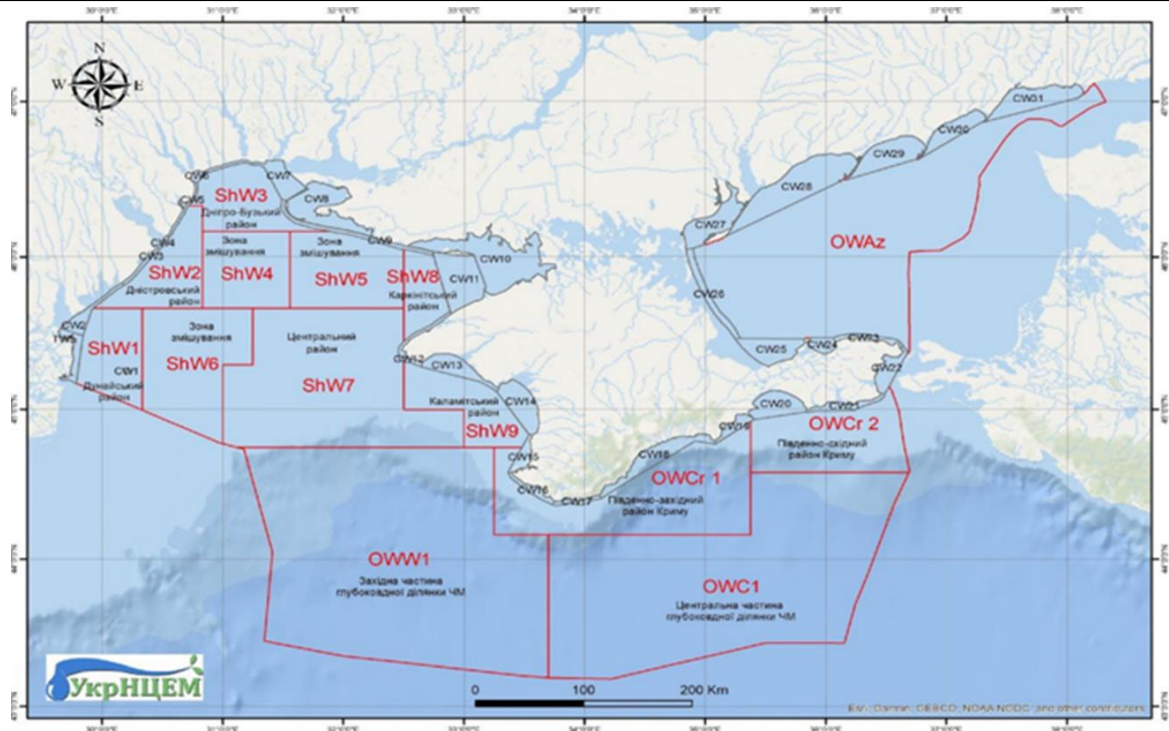


Рисунок 1: Екологічне районування українського сектору Азовського і Чорного морів [23].

В умовах російсько-української війни часові інтервали розірвані, а референсні умови порушені, що унеможливорює регулярний реальний відбір проб, бентосних зразків та гідрохімічних аналізів. В зв'язку з цим у суб'єктів екологічного моніторингу морського середовища немає можливості вимірювати ефективність моніторингу морських вод у визначених районах через здатність порахувати $TRIX$. Нам слід вимірювати її через Індекс інформаційної стійкості системи $R_{сис}$ – здатність системи взагалі передати критично важливу інформацію з моря до штабу ДСНС для оперативного прийняття обґрунтованого рішення щодо захисту населення і території від надзвичайних ситуацій, незалежно від природи їх походження.

Значення $R_{сис}$ інтегрального індексу інформаційної стійкості пропонується нормувати в діапазоні від 0 до 1. Для сценарної апробації моделі умовне порогове значення працездатності системи пропонується вважати $R_{сис} \geq 0,6$. Значення індексу, що дорівнює або перевищує цей рівень, у межах запропонованої моделі інтерпретується як достатнє для забезпечення передачі мінімально необхідного пакета верифікованих даних у межах допустимого часового інтервалу. Остаточне встановлення порогового значення потребує подальшої емпіричної верифікації.

Ентропія Шеннона в межах запропонованого підходу розглядається як теоретична основа для характеризування інформаційної невизначеності, що виникає внаслідок неповноти, втрати або недоступності даних про стан морського середовища. На цьому етапі дослідження ентропійний показник не включено безпосередньо до інтегрального індексу інформаційної стійкості; його кількісна інтеграція до математичної моделі становить напрям подальших досліджень.

Класична методологія моніторингу довкілля, закладена в державних нормативних актах [13, 24], базується на концепції гарантованого отримання та повноти даних. У мирний час ефективність системи визначалася спроможністю накопичувати максимально повні часові ряди для оцінки екологічного стану морських вод. Проте в умовах воєнного стану, де мережі спостережень зазнають фізичного та радіоелектронного ураження, концепція “повноти

даних” стає недосяжною і навіть шкідливою, оскільки змушує органи управління ДСНС очікувати на “ідеальні” дані, витрачаючи критичний час, що призводить до недопустимої затримки реагування.

Обговорення

Для оперативного (кризового) моніторингу морських вод в роботі пропонується парадигмальний зсув до концепції інформаційної стійкості. Ефективність СЕММВ тепер має оцінюватися не за обсягом даних, а за її здатністю забезпечувати мінімально необхідний потік інформації для прийняття управлінських рішень в умовах, коли:

частина вузлів спостереження знищена або фізично недоступна для суб’єктів;

канали зв’язку передачі даних знаходяться під постійним впливом засобів радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ);

географічні координати районів здійснення моніторингу піддаються спуфінгу (підміні або викривленню просторових координат).

Цей перехід передбачає, що ключовим показником стає не “якість довкілля як середньорічний показник”, а “інформаційна оперативність” та “завадостійкість інформаційного потоку”.

Оцінювання ефективності будь-якої складної організаційно-технічної системи вимагає чіткого визначення базового критерію її успішності. Критичний аналіз еволюції системи екологічного моніторингу морських вод України засвідчив, що її функціональна архітектура спирається на методологічний фундамент мирного часу, де головним мірилом ефективності виступає критерій “повноти екологічних даних”.

До 2022 року вітчизняна система моніторингу, реформована відповідно до Водної рамкової директиви ЄС та вимог підзаконного нормативно-правового акту [13] і розглядається як науково-дослідний інструмент. Ефективність СЕММВ мирного часу $E_{мч}$ вважалася максимальною, якщо вона була здатна забезпечити:

збір вичерпного масиву натурних даних за всіма 11 дескрипторами Рамкової директиви про морську стратегію;

формування безперервних, тривалих часових рядів без просторових та часових пропусків;

проведення розширених лабораторних аналізів для обчислення комплексних індексів екологічного стану (EQR, TRIX, бентосних індексів AMBI).

У цій парадигмі застосування методів прогнозування часових рядів, зокрема методу Хольта–Вінтерса, та моделей екосистемної динаміки типу AQUATOX ґрунтувалося на наявності достатньо повних, регулярних і якісних вхідних даних, формування яких у мирний час забезпечувалося систематичними спостереженнями. Часова затримка між відбором проб морської води та отриманням результатів лабораторного аналізу була менш критичною для моніторингу довгострокових екологічних тенденцій, ніж для оперативного реагування на раптові воєнно-техногенні загрози.

В умовах російсько-української війни та перенесенні бойових дій на морську акваторію, вимоги до СЕММВ мирного часу перетворилися на її вразливість, спостерігається дисфункція традиційного критерію “повноти даних” в умовах стохастичних загроз воєнного характеру. Тимчасова втрата доступу українських науковців до морських акваторій, зумовлена мінною небезпекою, встановленням зон обмеженого доступу, застосуванням засобів РЕБ та іншими воєнними загрозами, призвела до порушення встановленої періодичності спостережень та обмеження доступу до окремих районів територіальних вод.

Намагання системи діяти за критерієм “повноти даних”, пристосованого до умов мирного часу, під час імпульсних воєнно-техногенних катастроф призводить до відсутності ситуаційної обізнаності органів управління ЄДСЦЗ. Очікування повних результатів

лабораторного аналізу може спричиняти часову затримку в прийнятті оперативних рішень, що за умов швидкого поширення забруднення підвищує ризик його досягнення рекреаційних зон, районів риболовного промислу або водозаборів до початку відповідних заходів реагування.

Для розв'язання зазначеного протиріччя запропоновано концептуальну зміну підходу до оцінювання ефективності СЕММВ. Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні критерію інформаційної стійкості системи оперативного (кризового) моніторингу морських вод та його формалізації через інтегральний імовірнісний показник. Для потреб оперативного реагування в кризових ситуаціях пропонується перейти від критерію максимальної повноти екологічних даних до критерію інформаційної стійкості системи моніторингу.

В умовах воєнного стану ефективність інтегрованої системи моніторингу E_{BC} визначається не загальним обсягом зібраної інформації, а її здатністю гарантовано доставити критичний мінімум верифікованих даних до центрів прийняття рішень ДСНС в умовах активної протидії зовнішніх факторів та/або імпульсних воєнно-техногенних катастроф.

Цей перехід характеризується наступними концептуальними відмінностями вказаними в таблиці 2.

Таблиця 2: Концептуальні відмінності методик оцінювання ефективності СЕММВ

Характеристика	Традиційна методика (Мирний час)	Вимоги до методики (Воєнний стан / НС)
Головна мета системи	Оцінка екологічних трендів (TRIX, EQR)	Раннє попередження та ініціалізація моделей ДСНС.
Головний критерій ефективності	Повнота та безперервність даних $V_{\text{даних}} \rightarrow \max$.	Інформаційна стійкість $R_{\text{сис}} \rightarrow \max$.
Толерантність до затримки	Висока (дні, тижні на лабораторний аналіз)	Низька (години, реальний час).
Джерела даних	Науково-дослідні судна, стаціонарні пости	МБеК ВМС ЗСУ, супутники, телеметрія.
Математичний апарат оцінки	Математична статистика, лінійні тренди	Теорія надійності складних систем [25], Ентропія Шеннона
Реакція на втрату вузлів, зв'язку	Зупинка екологічного моніторингу (через неможливість наукових експедицій).	Динамічна маршрутизація, використання МБеК Сил оборони, активація військових захищених каналів проходження інформації.

Джерело: розроблено автором.

У межах запропонованого підходу навіть обмежений, але достатній для ідентифікації загрози набір базових даних, зокрема координати зони забруднення та значення концентрації маркерної речовини, переданий захищеним каналом у межах допустимого часового інтервалу, може мати вищу оперативну цінність для органів управління цивільного захисту, ніж повніший масив даних, отриманий із критичною затримкою.

Запропонований концептуальний перехід вимагає розроблення нового математичного апарату для формалізації та кількісного вимірювання показника стійкості системи, що базуватиметься на синтезі параметрів завадостійкості зв'язку, криптографічного захисту та метрологічної валідності.

З урахуванням визначених складових інтегральний індекс інформаційної стійкості СЕММВ пропонується представити як добуток імовірностей успішного функціонування трьох

критичних підсистем: збереження каналу зв'язку, забезпечення інформаційної безпеки та валідності отриманих даних:

$$R_{\text{сис}} = P_{\text{зв}} \cdot P_{\text{сек}} \cdot P_{\text{дост}} \rightarrow \max, \quad (3)$$

де $P_{\text{зв}}$ – канал зв'язку;
 $P_{\text{сек}}$ – інформаційна безпека;
 $P_{\text{дост}}$ – валідність даних.

У межах запропонованої концептуальної моделі складові інформаційної стійкості розглядаються як умовно незалежні, що дає змогу представити інтегральний показник у мультиплікативній формі. Таке припущення використовується для первинної формалізації показника та потребує подальшої емпіричної перевірки. У разі встановлення статистично значущої залежності між окремими складовими модель має бути уточнена з урахуванням умовних імовірностей їх спільного функціонування.

Запропонована модель інформаційної стійкості $R_{\text{сис}}$ дозволяє штабу ДСНС у реальному часі оцінювати поточний стан мережі моніторингу. Зниження інтегрального індексу інформаційної стійкості нижче прийнятого для сценарного моделювання порогового значення 0,6 свідчить про недостатню надійність інформаційного забезпечення для прийняття оперативних управлінських рішень та може бути підставою для залучення резервних або захищених каналів передавання даних.

В умовах воєнного стану систему екологічного моніторингу морських вод слід розглядати не як статичний масив постів, а як динамічну інформаційну мережу, де функціонування кожного каналу передачі даних залежить від імовірнісних характеристик середовища.

Математичне моделювання інформаційної стійкості системи моніторингу базується на концепції інтегрального індексу інформаційної стійкості $R_{\text{сис}}$. Ми визначаємо $R_{\text{сис}}$ як імовірність того, що система в будь-який момент часу t здатна доставити до центру прийняття рішень ДСНС верифіковану та достовірну інформацію про екологічну загрозу.

Для побудови моделі ми представляємо систему як послідовне з'єднання трьох критичних підсистем, кожна з яких має свою ймовірність безвідмовної роботи:

Канал зв'язку $P_{\text{зв}}$: здатність сигналу подолати завади РЕБ.

Інформаційна безпека $P_{\text{сек}}$: здатність каналу забезпечити цілісність даних та захист від підміни (спуфінгу).

Валідність даних $P_{\text{дост}}$: здатність системи верифікувати отримані дані (метрологічна відповідність).

Для врахування впливу воєнно-техногенних загроз загальну модель (3) конкретизовано через параметри, що характеризують стійкість каналу зв'язку до радіоелектронного впливу, захищеність інформації від несанкціонованого втручання та валідність отриманих даних. Параметризоване представлення моделі має вигляд:

$$R_{\text{сис}}(t) = P_{\text{зв}}(t) \cdot P_{\text{сек}}(t) \cdot P_{\text{дост}}(t), \quad (4)$$

де $P_{\text{зв}}(t) = e^{-\lambda_{\text{зав}} \cdot t}$ – імовірність збереження зв'язку під дією РЕБ, а $e^{-\lambda_{\text{зав}} \cdot t}$ – інтенсивність ворожого радіоелектронного придушення;
 $P_{\text{сек}}(t) = 1 - P_{\text{вик}} \cdot \exp(-\alpha \cdot K_{\text{крз}})$ – імовірність захисту від кібервтручання, а $K_{\text{крз}}$ – рівень криптографічного захисту, що впроваджується через інтеграцію з військовими стандартами STANAG 4774 та STANAG 4778 згідно з

принципами криптографічного зв'язування метаданих [26, 27, 28];
 $P_{\text{дост}}(t)$ – імовірність того, що дані не були спотворені та пройшли процедуру санітизації і верифікації.

Наукова інтерпретація моделі та деградація цивільної системи:

У мирний час ми приймали: $P_{\text{зв}} = 1$, $P_{\text{сек}} = 1$, $P_{\text{дост}} = 1$, отже $R_{\text{сис}} = 1$. Система була ідеально стійкою.

Воєнна реальність під впливом інтенсивного РЕБ в умовах війни:

$e^{-\lambda_{\text{зав}} \cdot t} > 0$, як результат: $P_{\text{сек}} \rightarrow 0$ внаслідок відсутності криптографічного захисту в цивільних пристроях. Тому $R_{\text{сис}} \rightarrow 0$. Система екологічного моніторингу морських вод стає “сліпою” та ненадійною.

Сценарне моделювання та апробація запропонованого підходу.

Згідно з теорією надійності та методологією побудови систем захисту інформації, перехід від абсолютних значень до нормованих дозволяє вимірювати показники за шкалою від 0 до 1 або у відсотках від 0% до 100%.

Для сценарної апробації запропонованого підходу та оцінювання поведінки інтегрального індексу інформаційної стійкості за різного рівня впливу зовнішніх дестабілізуючих чинників проведено розрахунки для трьох модельних сценаріїв.

Числові значення параметрів, використані в модельних сценаріях, мають умовний характер і не є результатами натурних вимірювань. Їх задано для демонстрації зміни інтегрального індексу інформаційної стійкості за різного рівня деградації окремих складових системи. Емпіричне калібрування параметрів моделі становить предмет подальших досліджень.

Сценарій 1. Нормальне функціонування за умов мирного часу.

Цивільна система моніторингу функціонує у штатному режимі як відкрита інформаційна мережа для запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям. Дані надходять регулярно та в повному обсязі без зовнішнього деструктивного впливу.

Вхідні дані:

$P_{\text{зв}} = 0,99$ – втрата пакетів даних становить лише 1% через природні перешкоди;

$P_{\text{дост}} = 0,99$ – система працює у штатному відкритому режимі, загроза цілеспрямованого кібервтручання мінімальна;

$P_{\text{дост}} = 0,99$ – сенсори регулярно обслуговуються, метрологічна похибка мінімальна.

Розрахунок: $R_{\text{сис}} = 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 = 0,970299 \approx 0,97$

Висновок: За заданих умов інтегральний індекс інформаційної стійкості становить 0,97 та перевищує прийняте для сценарного моделювання умовне порогове значення 0,6, що свідчить про високий розрахунковий рівень інформаційної стійкості системи.

Сценарій 2. Часткова втрата можливості отримати необхідні дані.

Під час кризового режиму значення $R_{\text{сис}}$ падає нижче порогу 0,6. Відбувається затримка пакетів та часткова втрата вузлів. Система сигналізує про неможливість прийняття рішень виключно на отриманих цивільних даних. Потрібна інтеграція даних дистанційного зондування Землі, наприклад, супутникові знімки Sentinel-1 або база даних Copernicus для здійснення оперативної оцінки масштабів надзвичайної ситуації.

Вхідні дані:

$P_{\text{зв}} = 0,70$ – через завади засобів РЕБ 30% сигнали втрачаються або надходять із затримкою;

$P_{\text{дост}} = 0,90$ – з'являється ймовірність 10% перехоплення або спотворення даних через відсутність військового криптографічного захисту;

$P_{\text{дост}} = 0,85$ – валідність знижується на 15% через відсутність доступу до об'єкта моніторингу та мінну небезпеку.

Розрахунок: $R_{\text{сис}} = 0,70 \cdot 0,90 \cdot 0,85 = 0,5355 \approx 0,54$

Висновок: Отримане значення 0,54 падає нижче прийнятого для сценарного моделювання умовного порогового значення 0,6. У таких кризових ситуаціях доцільним є залучення додаткових джерел даних, зокрема засобів дистанційного зондування Землі.

Сценарій 3. Критична деградація цивільної системи моніторингу та необхідність залучення МБЕК.

Цивільна мережа повністю придушена РЕБ, дані не захищені криптографічно і можуть бути підмінені (викривлені). Система втратила можливість отримувати необхідні дані. Виникає негайна необхідність використання військових каналів передачі даних із впровадженням засобів криптографічного захисту.

Вхідні дані:

$P_{\text{зв}} = 0,20$ – 80 % каналів отримання даних повністю придушені;

$P_{\text{дост}} = 0,50$ – 50 % даних, що проходять, є вразливими до спотворення;

$P_{\text{дост}} = 0,40$ – 60 % даних є недостовірними або відсутня можливість їх отримання.

Розрахунок: $R_{\text{сис}} = 0,20 \cdot 0,50 \cdot 0,40 = 0,04$

Висновок: Стійкість системи наближається до нуля $0,04 < 0,6$. Система повністю втрачає свою інформаційну стійкість. Отримане значення свідчить про критичну деградацію інформаційної стійкості цивільної системи моніторингу та обґрунтовує необхідність залучення альтернативних захищених каналів передавання і засобів отримання даних, зокрема МБЕК.

Запропонований підхід до побудови СЕММВ ґрунтується на моделі подвійного призначення, орієнтованій на зниження інформаційної невизначеності та підвищення інформаційної стійкості системи в умовах воєнного стану. Функція відображає принципово нову роль екологічного моніторингу морських вод як складової Сил цивільного захисту.

В умовах воєнного стану γ є високим, тому будь-яка затримка суттєво збільшує ризики для морського середовища та населення, що мешкає на ділянках морського узбережжя.

Наша система дає можливість мінімізувати інформаційну невизначеність для державних органів управління ЄДСЦЗ, штабу ДСНС з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій або органів військового управління Сил безпеки та оборони України, з метою своєчасного реагування на інцидент, незалежно від природи його походження.

Висновки

У ході проведеного дослідження отримано наступні результати:

1. Встановлено, що традиційна методологія екологічного моніторингу морських вод, орієнтована на абсолютну повноту даних та тривалі лабораторні аналізи, демонструє критичне зниження ефективності СЕММВ та не здатна забезпечити підтримку прийняття оперативних рішень в кризових умовах воєнно-техногенних загроз.

2. Обґрунтовано концептуальний перехід до проактивної кризової моделі управління, що базується на зміні головного критерію ефективності з отримання “повноти екологічних даних” на “інформаційну стійкість” СЕММВ.

3. Запропоновано використання МБЕК як одного з оперативних засобів збору верифікованих даних в умовах мінної небезпеки та обмеження доступу суб'єктів моніторингу до морської акваторії.

4. Формалізовано інтегральний показник інформаційної стійкості СЕММВ на основі апарату теорії надійності, який враховує ймовірності збереження каналу зв'язку, забезпечення інформаційної безпеки та валідності отриманих даних. Ентропію Шеннона визначено як

перспективний інструмент подальшого кількісного оцінювання інформаційної невизначеності системи.

5. Практичне значення результатів полягає в тому, що запропонований підхід може бути використаний для інформаційного забезпечення органів управління ЄДСЦЗ під час оперативного реагування на надзвичайні ситуації на основі мінімально необхідного обсягу верифікованих даних без очікування формування їх повного масиву.

6. Обмеження дослідження полягають у тому, що на даному етапі запропонована математична модель має переважно концептуальний характер і потребує емпіричної перевірки в умовах реального впливу засобів РЕБ на засоби ведення моніторингу.

Напрямами подальших досліджень є побудова комплексної стохастичної математичної моделі оперативного застосування та розроблення алгоритмів динамічної маршрутизації морських безекіпажних комплексів (МБЕК) в умовах воєнно-техногенних загроз.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел

1. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17> (дата звернення: 13.06.2026).
2. Положення про єдину державну систему цивільного захисту : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 09.01.2014 № 11. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text> (дата звернення: 13.06.2026).
3. Порядок функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 13.06.2024 № 684 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: [офіційний текст постанови № 684](#) (дата звернення: 13.06.2026).
4. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. Відомості Верховної Ради України. 1991. № 41. С. 546. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 24.06.2026).
5. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля: Закон України від 20.03.2023 № 2973-IX. Офіційний вісник України. 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20> (дата звернення: 24.06.2026).
6. Концепція комплексної системи моніторингу довкілля регіонів України / О. О. Бондар та ін. Екологічні науки. 2023. №2(47). С. 138-143. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.23>.
7. Про внесення змін до Порядку здійснення державного моніторингу вод: постанова Кабінету Міністрів України від 10 черв. 2026 р. № 754. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/754-2026-п>. (Дата звернення: 15.07.2026).
8. Жук В.М. Моделювання та прогнозування екологічних показників якості води із застосуванням статистичних методів. Науковий вісник. 2018. Вип. 4. С. 112–119.

9. Komorin, V. (2021). Assessment of the Black Sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*, 16(2), 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
10. Errachdi, H., Felis, I., Madrid, E., & Martínez, R. (2023). Bridging the gap: Challenges and opportunities of IoT and wireless sensor networks in marine environmental monitoring. *Engineering Proceedings*, 58(1), 102. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16158>
11. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
12. Elmakis, O., Polinov, S., Shaked, T., Gordon, G., & Degani, A. (2024). OS-BREEZE: Oil spills boundary red emission zone estimation using unmanned surface vehicles. *Sensors*, 24(2), 703. <https://doi.org/10.3390/s24020703>
13. Порядок здійснення державного моніторингу вод: затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 №758 (зі змінами). Офіційний вісник України. 2018. №76. С. 2531.
14. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради Європи “Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики” від 23 жовтня 2000р. Офіційний вісник Європейського Союзу. 2000. L 327. С. 1–73.
15. Директива 2008/56/ЄС Європейського Парламенту та Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері екологічної політики щодо морського середовища» від 17 червня 2008р. Офіційний вісник Європейського Союзу. 2008. L 164. С. 19–40.
16. International Organization for Standardization, & International Electrotechnical Commission. (2017). *General requirements for competence of testing and calibration laboratories* (ISO/IEC Standard No. 17025:2017). iso.org
17. Про затвердження Методики визначення збитків, заподіяних внаслідок забруднення та/або засмічення вод, самовільного користування водними ресурсами: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 21.07.2022р. №252. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0903-22> (дата звернення: 24.06.2026).
18. Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., & Rinaldi, A. (1998). Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9(3), 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9)
19. Borja, A., Franco, J., & Pérez, V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin*, 40(12), 1100–1114. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00061-8)
20. Muxika, I., Borja, A., & Bald, J. (2007). Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6), 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.05.025>
21. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
22. Winters, P. R. (1960). Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*, 6(3), 324–342. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.3.324>
23. Про схвалення Морської природоохоронної стратегії України: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 11.10.2021 №1241-р. Офіційний вісник України. 2021. № 82. С. 131. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1241-2021-%D1%80> (дата звернення: 24.06.2026).
24. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля: Постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 №391 (зі змінами). Офіційний вісник України.

1998. №13. С. 496. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF> (дата звернення: 24.06.2026).
25. Половко А.М., Гуров С.В. Основи теорії надійності: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Вища школа, 2008. 402 с.
26. Офіс стандартизації НАТО. (2017). Синтаксис міток конфіденційності метаданих (STANAG 4774, вид. 1). nato.int.
27. Офіс стандартизації НАТО. (2018). Механізм зв'язування метаданих (STANAG 4778, вид. 1). nato.int.
28. Комбінована рада з питань зв'язку та електроніки. (2025). Специфікація формату даних нульової довіри (ZTDF) (Союзна комунікаційна публікація АСР 240, Дод. 3/4). cceb.org.

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2012). Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Code of Civil Protection of Ukraine] (Law of Ukraine No. 5403-VI, October 2, 2012). Retrieved June 13, 2026, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2014). Polozhennia pro yedynu derzhavnu systemu tsyvilnoho zakhystu [Regulation on the Unified State Civil Protection System] (Resolution No. 11, January 9, 2014). Retrieved June 13, 2026, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text>
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). Poriadok funktsionuvannia derzhavnoi systemy monitorynhu dovkillia ta yii pidsystem [Procedure for the Functioning of the State Environmental Monitoring System and Its Subsystems] (Resolution No. 684, June 13, 2024). Retrieved June 13, 2026, [офіційний текст постанови № 684](#)
4. Verkhovna Rada of Ukraine. (1991). Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha [On Environmental Protection] (Law of Ukraine No. 1264-XII, June 25, 1991). Retrieved June 24, 2026, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>
5. Verkhovna Rada of Ukraine. (2023). Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo derzhavnoi systemy monitorynhu dovkillia, informatsii pro stan dovkillia (ekolohichnoi informatsii) ta informatsiinoho zabezpechennia upravlinnia u sferi dovkillia [On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding the State Environmental Monitoring System, Environmental Information, and Information Support for Environmental Governance] (Law of Ukraine No. 2973-IX, March 20, 2023). Retrieved June 24, 2026, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20>
6. Bondar, O. O., et al. (2023). Kontseptsiiia kompleksnoi systemy monitorynhu dovkillia rehioniv Ukrainy [Concept of the Integrated Environmental Monitoring System for the Regions of Ukraine]. *Ekolohichni nauky*, 2(47), 138–143. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.23>
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2026). Pro vnesennia zmin do Poriadku zdiisnennia derzhavnoho monitorynhu vod [On Amendments to the Procedure for State Water Monitoring] (Resolution No. 754, June 10, 2026). Retrieved July 15, 2026, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/754-2026-n>.
8. Zhuk, V. M. (2018). Modeliuvannia ta prohnozuvannia ekolohichnykh pokaznykiv yakosti vody iz zastosuvanniam statystychnykh metodiv. *Naukovyi visnyk*, (4), 112–119.
9. Komorin, V. (2021). Assessment of the Black Sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*, 16(2), 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
10. Errachdi, H., Felis, I., Madrid, E., & Martínez, R. (2023). Bridging the gap: Challenges and opportunities of IoT and wireless sensor networks in marine environmental monitoring. *Engineering Proceedings*, 58(1), 102. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16158>

11. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
12. Elmakis, O., Polinov, S., Shaked, T., Gordon, G., & Degani, A. (2024). OS-BREEZE: Oil spills boundary red emission zone estimation using unmanned surface vehicles. *Sensors*, 24(2), 703. <https://doi.org/10.3390/s24020703>
13. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2018). *Poriadok zdiisnennia derzhavnoho monitorynhu vod* [Procedure for state water monitoring] (Resolution No. 758). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF>
14. European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>
15. European Parliament & Council of the European Union. (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, L 164, 19–40. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0056>
16. International Organization for Standardization, & International Electrotechnical Commission. (2017). *General requirements for competence of testing and calibration laboratories* (ISO/IEC Standard No. 17025:2017). iso.org
17. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2022). *Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia zbytkiv, zapodiianykh vnaslidok zabrudnennia ta/abo zasmichennia vod, samovilnoho korystuvannia vodnymi resursamy* [On approval of the Methodology for determining damages caused by water pollution and/or littering and unauthorized use of water resources] (Order No. 252, July 21, 2022). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0903-22>
18. Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., & Rinaldi, A. (1998). Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9(3), 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9)
19. Borja, A., Franco, J., & Pérez, V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin*, 40(12), 1100–1114. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00061-8)
20. Muxika, I., Borja, A., & Bald, J. (2007). Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6), 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.05.025>
21. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
22. Winters, P. R. (1960). Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*, 6(3), 324–342. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.3.324>
23. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021). *Pro skhvalennia Morskoï pryrodookhoronnoi stratehii Ukrainy* [On approval of the Marine Environmental Strategy of Ukraine] (Order No. 1241-r, October 11, 2021). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, 82, 131. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1241-2021-%D1%80>
24. Cabinet of Ministers of Ukraine. (1998). *Pro zatverdzhennia Polozhennia pro derzhavnu systemu monitorynhu dovkillia* [On approval of the Regulation on the State Environmental Monitoring

- System] (Resolution No. 391, March 30, 1998). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, 13, 496.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF>
25. Polovko, A. M., & Hurov, S. V. (2008). *Osnovy teorii nadiinosti* [Fundamentals of reliability theory] (2nd ed., rev. & enl.). Vyshcha shkola.
26. NATO Standardization Office. (2017). *Metadata confidentiality label syntax (STANAG 4774, Ed. 1)*. NATO.
27. NATO Standardization Office. (2018). *Metadata binding mechanism (STANAG 4778, Ed. 1)*. NATO.
28. Combined Communications-Electronics Board. (2025). *Zero trust data format (ZTDF) specification (Allied Communications Publication ACP 240, Supp. 3/4)*. CCEB.



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.