

УДК 551.583, 551.58.001.57;551.58:551.509.3;551.58.001.18, 504.054/.058
КП 37.23.29, 37.23.31, 87.03.17.07
№ держреєстрації 0126U002526
Інв. №

МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ
УКРАЇНИ
НДУ «УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР ЕКОЛОГІЇ МОРЯ» (УКРНЦЕМ)
65009, м. Одеса, Французький бульвар, 89. тел. (094) 9468721
e-mail: accem@te.net.ua, www.sea.gov.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директора УкрНЦЕМ,

канд. геогр. наук, доцент

Олег ГРИБ

2025 р.



ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ОЦІНКА ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА СТАН МОРСЬКОГО
ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНИ

ЕТАП 1. АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ ТА ДАНИХ ЩОДО
КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ТА ЇХНЬОГО ВПЛИВУ НА МОРСЬКЕ ДОВКІЛЛЯ
(проміжний)

Науковий керівник НДР:
заступник директора з науки,
канд. геогр. наук, старш. наук. співроб.

Віктор КОМОРИН

2025

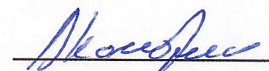
Рукопис закінчено 26 грудня 2025 р.

Результати роботи розглянуто Вченою Радою УкрНЦЕМ,
протокол № 9 від 30 грудня 2025.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник

заст. дирек. з науки УкрНЦЕМ


"26" 12 2025

В. М. Коморін

(вступ; розділ 1, 4
висновки, загальна
редакція)

Відповідальний виконавець:

Начальник відділу фізичної

океанографії та математичного моделювання


"26" 11 2025


Ю.М.Диханов

(розділ 2)

Виконавці

Начальник морського

інформаційно-аналітичного центру
УкрНЦЕМ


"26" 12 2025

А.С.Тітяпкин

(розділ 3)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 52 с., 6 рис., джерел 66.

Об'єктом дослідження є глобальні та регіональні прояви кліматичних змін в океані й морях та пов'язані з ними процеси трансформації фізичного стану морського середовища і біогеохімічних режимів, що визначають екологічні реакції та ризики для морського довкілля. Предмет дослідження становлять сучасні наукові узагальнення, міжнародно визнані оцінки, спостережні ряди та інтегровані набори даних, які описують ключові індикатори кліматично зумовлених змін (накопичення тепла, зміни температури, рівень моря, закислення, кисневий режим, циркуляцію, стратифікацію, екстремальні явища) та підходи до їх інтерпретації, оцінювання невизначеностей і доказовості.

Метою роботи є формування узгодженої доказової та методичної основи для подальших етапів п'ятирічної теми (2025–2029), зокрема для кількісного оцінювання ризиків і наслідків кліматичних змін для морського довкілля України. У звітному 2025 році виконано аналітичний огляд світового досвіду та даних щодо проявів кліматичних змін в океані й морях, а також щодо механізмів впливу на морське середовище, біогеохімічні процеси та екосистеми, із подальшою систематизацією результатів за тематичними блоками та рівнями доказовості.

Методична основа роботи включала аналітичний огляд із елементами систематизованого відбору джерел, порівняльне зіставлення незалежних «ліній доказів» (міжнародні оцінки, рецензовані публікації, моніторингові продукти та довідкові індикатори), а також критеріальну оцінку якості даних і надійності висновків за ознаками рецензованості, тривалості та однорідності рядів, просторового покриття, наявності метаданих, процедур контролю якості та явного опису невизначеностей. Узагальнення виконано у причинно-наслідковій послідовності «фізичні зміни → біогеохімічні зміни → екологічні

наслідки → соціально-економічні ризики», що забезпечує придатність огляду як підґрунтя для наступних прикладних розрахунків.

У результаті роботи сформовано структуровану доказову базу щодо сучасних тенденцій кліматичних змін у морському середовищі. Підтверджено багатокомпонентний характер кліматичного сигналу океану: зростання теплового вмісту та потепління поверхневих і глибинних вод із впливом на стратифікацію та режими перемішування; підвищення середнього рівня моря з ознаками прискорення внаслідок поєднання теплового розширення й внеску танення льодовикових та крижаних мас; довготривалі зміни карбонатної системи морської води через поглинання антропогенного CO₂, що проявляються у тенденціях зниження рН і зміні насичення карбонатними мінералами; зменшення вмісту розчиненого кисню у водній товщі з формуванням зон підвищеного ризику, особливо чутливих для прибережних морів; зростання ролі екстремальних явищ, зокрема морських теплових хвиль, які виступають «мультиплікаторами» екологічних наслідків і можуть різко підвищувати вразливість екосистем у короткі проміжки часу. Для кожного блоку узагальнено типи індикаторів, типові темпи змін, джерела невизначеностей та обмеження переносимості глобальних висновків на напівзамкнені та прибережні моря.

Окремим результатом є узагальнення світових підходів до даних і систем спостережень. Показано, що глобальні системи забезпечують відносно кращу підтримку для фізичних змінних, тоді як найбільш системні «прогалини» стосуються біогеохімії та прибережної зони, де локальні процеси визначають ризики для екосистем і послуг, але спостережні мережі нерівномірні, а ряди часто розривні. Сформульовано вимоги до даних для подальших етапів теми: стандартизовані метадані, відтворювані QA/QC-процедури, сумісність форматів і словників, версіонування продуктів та прозора простежуваність походження даних. Обґрунтовано роль Black Sea e-Platform, що функціонує на базі УкрНЦЕМ, як регіонального вузла для інтеграції національних і проєктних даних із міжнародними потоками та

стандартами, а також для підвищення відтворюваності й доказовості висновків у національному контексті.

Ключові слова: кліматичні зміни, океан, потепління океану, тепловий вміст океану, температура поверхні моря, рівень моря, океанічне закислення, карбонатна система, зменшення вмісту розчиненого кисню, стратифікація, морські теплові хвилі, екстремальні явища, системи спостережень, Copernicus Marine Service, Argo, EMODnet, FAIR, Black Sea e-Platform, Україна.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 8 |
| ВСТУП | 11 |
| 1 Матеріали та методи | 15 |
| 1.1. Принципи відбору джерел інформації..... | 15 |
| 1.2. Критерії якості та надійності..... | 17 |
| 1.3. Метод систематизації та узагальнення..... | 18 |
| 2 Світові тенденції кліматичних змін у океані та морях..... | 21 |
| 2.1. Потепління океану: показники, темпи, невизначеності..... | 21 |
| 2.2. Зміни рівня моря | 23 |
| 2.3. Океанічне закислення..... | 25 |
| 2.4. Зменшення вмісту розчиненого кисню | 27 |
| 2.5. Зміни в циркуляції, стратифікації, екстремальні явища..... | 28 |
| 3 Вплив кліматичних змін на морські екосистеми: узагальнення світового досвіду..... | 31 |
| 3.1. Типові реакції екосистем | 31 |
| 3.2. Біогеохімічні наслідки..... | 32 |
| 3.3. Вплив на біорізноманіття та ключові групи організмів | 33 |
| 3.4. Ризики для екосистемних послуг | 34 |
| 4 Дані та системи спостережень | 36 |
| 4.1. Основні глобальні та регіональні програми і платформи даних..... | 36 |
| 4.2. Узагальнені прогалини спостережень | 38 |
| 4.3. Вимоги до якості даних..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 4.4. Висновки для українського контексту..... | 40 |
| ВИСНОВКИ..... | 42 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 46 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- AIC - автоматична ідентифікаційна система (суден)
- AR6 - Шоста оціночна доповідь Міжурядової групи експертів зі зміни клімату
- ARGO (Argo) - глобальна мережа автономних профілювальних буїв
- BGC-Argo - біогеохімічний сегмент програми Argo
- BS e-Platform - Чорноморська електронна платформа даних (Black Sea e-Platform)
- CF (Conventions) - конвенції метаданих Climate and Forecast для NetCDF
- CCHDO - Центр кліматичних гідрографічних даних (Climate and Ocean Hydrographic Data Office)
- CMEMS - Служба морського моніторингу програми «Копернік» (Copernicus Marine Service)
- CO₂ - діоксид вуглецю
- DQI - індикатор якості даних (Data Quality Indicator)
- DOALOS - Відділ ООН з океанських питань і морського права
- DTM - цифрова модель рельєфу (дна)
- EMODnet - Європейська мережа спостережень і даних про морське середовище (European Marine Observation and Data Network)
- FAO - Продовольча та сільськогосподарська організація ООН
- FAIR - принципи керування даними: знаходжуваність, доступність, інтеперабельність, повторне використання
- GDAC - Глобальні центри збирання даних Argo (Global Data Assembly Centers)
- GEBCO - Генеральна батиметрична карта океанів
- GLODAP - Глобальний проєкт аналізу океанічних даних (Global Ocean Data Analysis Project)
- GO-SHIP - Глобальна програма повторних суднових гідрографічних розрізів
- GOOS - Глобальна система спостережень за океаном (Global Ocean Observing System)

IOU-UNESCO - Міжурядова океанографічна комісія ЮНЕСКО

IPCC - Міжурядова група експертів зі зміни клімату

ISO - Міжнародна організація зі стандартизації

in situ - вимірювання безпосередньо в природному середовищі
(польові/натурні)

МСФД - Рамкова директива ЄС про морську стратегію (Marine Strategy Framework Directive, MSFD)

МОК-ЮНЕСКО - Міжурядова океанографічна комісія ЮНЕСКО

NASA - Національне управління США з аеронавтики і дослідження космічного простору

NCEI - Національні центри екологічної інформації NOAA (National Centers for Environmental Information)

NetCDF - мережевий загальний формат даних (Network Common Data Form)

NOAA - Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США

NVS - Сервіс контрольованих словників NERC (NERC Vocabulary Server)

ОА - океанічне закислення (ocean acidification)

OBIS - Інформаційна система з біорізноманіття океану (Ocean Biodiversity Information System)

OBPS - Система «кращих практик» океанічних спостережень (Ocean Best Practices System)

OceanOPS - міжнародний центр координації/моніторингу систем in situ спостережень океану

OceanSITES - глобальна мережа довготривалих океанічних станцій та часових рядів

OSR - Звіт про стан океану/морів програми «Копернік» (Ocean State Report)

pH - водневий показник (міра кислотності)

QA/QC - забезпечення та контроль якості даних (Quality Assurance/Quality Control)

QARTOD - рекомендації/процедури QA/QC для оперативних океанографічних даних (Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data)

SROCC - Спеціальна доповідь IPCC «Океан і криосфера в умовах зміни клімату»

SST - температура поверхні моря (Sea Surface Temperature)

WIGOS - Інтегрована глобальна система спостережень ВМО

WIS - Інформаційна система ВМО (WMO Information System)

WMO - Всесвітня метеорологічна організація

WOA II - Друга оцінка стану Світового океану (Second World Ocean Assessment)

WoRMS - Всесвітній реєстр морських видів (World Register of Marine Species)

WOD - Світова океанографічна база даних (World Ocean Database)

WG1 - Робоча група I IPCC (фізичні основи зміни клімату)

ВСТУП

Морське довкілля України, представлене акваторіями Чорного й Азовського морів та пов'язаними з ними прибережними екосистемами, належить до природних систем із підвищеною чутливістю до кліматичних змін і водночас є простором концентрації важливих соціально-економічних функцій. Сучасні кліматичні тенденції проявляються через зростання температури повітря і морської води, трансформацію сезонних і міжрічних режимів атмосферної циркуляції, зміну характеру опадів і річкового стоку, посилення частоти та інтенсивності екстремальних гідрометеорологічних явищ, а також довгострокове підняття середнього рівня моря. Для морських екосистем такі зсуви означають модифікацію фізичних і біогеохімічних умов існування, зокрема зміну стратифікації й водообміну, варіації солоності, перерозподіл поживних речовин, трансформацію кисневого режиму та параметрів карбонатної системи. Сукупно ці процеси здатні змінювати продукційні характеристики, структуру угруповань, просторовий розподіл і фенологію біоти, а також стійкість екосистем до супутніх навантажень.

Особливість українського морського простору полягає у поєднанні кліматичних чинників із високим антропогенним пресингом прибережної зони, історичною трофічною напругою окремих районів, специфікою напівзамкненої морської системи Чорного моря та додатковими ризиками, пов'язаними з наслідками воєнних впливів. У таких умовах потреба у науково обґрунтованому аналізі змін та їхніх екологічних наслідків виходить за межі суто описового моніторингу і набуває прикладного значення для підтримки управлінських рішень. Йдеться про формування адаптаційних підходів, що дозволяють зменшувати вразливість екосистем і прибережної інфраструктури, забезпечувати безперервність державного моніторингу вод, підвищувати готовність до екстремальних явищ та узгоджувати національні політики із сучасними європейськими та міжнародними рамками управління морським середовищем.

Виконання наукової (науково-технічної) роботи здійснюється у межах реалізації державних політик у сфері охорони морського довкілля, раціонального природокористування та виконання міжнародних зобов'язань України. Нормативно-правовою та стратегічною основою роботи є положення Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Морської природоохоронної стратегії України» від 11 жовтня 2021 р. № 1240-р, Постанови Кабінету Міністрів України від 25.06.2020 № 614 «Про затвердження положення про Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України», а також Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.02.2019 № 2697-VIII. Додатково підставою виконання виступають вимоги Постанови Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 № 758 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод», положення Постанови Кабінету Міністрів України від 25.10.2017 № 1106 щодо виконання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Постанови Кабінету Міністрів України від 07.10.2009 № 1307 «Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року», а також пріоритети й цілі, визначені Стратегічним Планом Дій щодо відтворення та захисту Чорного моря (1996, 2009 рр.). Сукупність зазначених документів формує рамкові вимоги до наукового забезпечення оцінювання стану морського довкілля, ідентифікації чинників ризику та підготовки практичних рекомендацій щодо запобігання деградації морських екосистем і підвищення їхньої адаптивної спроможності.

Метою роботи є підготовка науково обґрунтованих рекомендацій щодо адаптаційних заходів і стратегій, спрямованих на зменшення вразливості морського довкілля України до зміни клімату. Досягнення цієї мети передбачає послідовне виконання комплексу взаємопов'язаних завдань упродовж 2025-2029 років, які охоплюють узагальнення світового досвіду та релевантних даних, ідентифікацію ключових кліматичних чинників, що визначають трансформацію морських екосистем України, оцінювання змін

стану екосистем у відповідь на кліматичні впливи, розроблення підходів до прогнозування потенційних довгострокових наслідків та формування практико-орієнтованих рекомендацій щодо адаптації. Логіка теми передбачає перехід від етапу накопичення й критичного аналізу доказової бази до етапів кількісного оцінювання, сценарного аналізу й підготовки інструментальних рекомендацій, придатних для застосування у системі державного управління та моніторингу.

Перший рік виконання теми присвячено реалізації завдання аналізу світового досвіду та даних щодо кліматичних змін і їхнього впливу на морське довкілля. Зміст цього завдання полягає у формуванні надійної наукової основи для наступних етапів робіт шляхом систематизації сучасних міжнародних оцінок, узагальнення рецензованих наукових результатів і визначення найбільш релевантних для морського простору України індикаторів та причинно-наслідкових механізмів. У рамках аналізу розглядаються ключові прояви кліматичних змін у океані та морях, зокрема потепління морської води, підняття рівня моря, зміни солоності й стратифікації, зменшення вмісту розчиненого кисню, океанічне закислення, зміни циркуляції та зростання ролі екстремальних явищ. Окрему увагу приділено тому, яким чином ці процеси трансформують екологічний стан морських екосистем, впливають на біорізноманіття та екосистемні послуги, змінюють ризиковий профіль прибережної зони та потребують адаптаційних управлінських відповідей.

Об'єктом дослідження у межах теми є морське довкілля України, включно з морськими водами та функціонально пов'язаними прибережними екосистемами Чорного й Азовського морів, розглянутими в контексті довгострокових кліматичних змін.

Предметом дослідження виступають закономірності та механізми впливу кліматично зумовлених змін фізичних і біогеохімічних параметрів морського середовища, таких як температура, солоність і стратифікація, середній рівень моря, параметри карбонатної системи, розчинений кисень та характеристики екстремальних гідрометеорологічних явищ, на стан,

структуру й функціонування морських екосистем, а також пов'язані з цим екологічні ризики та зміни в наданні екосистемних послуг.

У 2025 році в межах виконання теми здійснено науково-аналітичний огляд і проведено критичну систематизацію доказової бази щодо проявів кліматичних змін в океані та морях і пов'язаних із ними впливів на морське довкілля, із акцентом на значущість для українського морського простору. Узагальнено висновки провідних міжнародних оціночних матеріалів і рецензованих наукових публікацій, а також структуровано ключові індикатори кліматично зумовлених змін, які застосовуються у світовій практиці для оцінювання стану морського середовища та тенденцій його трансформації.

Окремим результатом 2025 року стала систематизація основних наборів даних і систем спостережень, що використовуються для аналізу кліматичних змін у морях, із характеристикою їхнього просторового й часового покриття, типовими обмеженнями, вимогами до якості даних і метаданих, а також із визначенням можливостей їхнього застосування для подальших етапів теми. У підсумку сформовано узгоджене поле знань, у межах якого описано типові причинно-наслідкові ланцюги «кліматичний чинник - зміни морського середовища - екологічна відповідь - ризики та наслідки», та окреслено коло методичних підходів і практик, що можуть бути адаптовані до умов України. Отримані узагальнення використано для уточнення напрямів подальших досліджень і підготовки підґрунтя для наступного етапу робіт, орієнтованого на ідентифікацію ключових кліматичних чинників для морських екосистем України та перехід до кількісного оцінювання змін екосистемного стану.

1 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

1.1. Принципи відбору джерел інформації

Огляд виконано як аналітичний (scoping) огляд із елементами систематизованого відбору, спрямований на формування узгодженої доказової бази щодо проявів кліматичних змін у морях та механізмів їхнього впливу на морське довкілля України. Відбір джерел здійснювався за принципом «рамкові міжнародні оцінки → операційні сервіси даних → регіонально релевантні рецензовані дослідження», що дозволяє поєднати авторитетні узагальнення, інструментальні ряди та приклади застосування методів на матеріалі Чорного моря.

Базовий «каркас» огляду сформовано міжнародними оціночними документами та узагальненнями, які визначають сучасний рівень знань, усталену термінологію, причинно-наслідкові механізми та підходи до трактування невизначеностей. До таких джерел віднесено *State of the Ocean Report* МОК-ЮНЕСКО як профільне морське узагальнення щодо стану океану та ключових процесів (потепління, закислення, зменшення вмісту розчиненого кисню, рівень моря, екстремальні явища, наслідки для екосистем) [1], а також матеріали Регулярного процесу ООН (WOA II) як міждисциплінарну рамку, що інтегрує природничі та соціально-економічні аспекти стану морського середовища [3]. Додатково використано довідкові матеріали Регулярного процесу ООН щодо WOA II та пов'язаних десятиліть ООН, які окреслюють місце глобальних оцінок у формуванні політик і пріоритетів, важливих для подальшої адаптації висновків до національних потреб [4]. Для уніфікації підходів до рівнів впевненості та представлення невизначеностей залучено рамкові оцінки IPCC (AR6, WG1) як загальновизнаний стандарт наукової атрибуції доказовості в кліматології [2].

Як джерела даних і приклади операційного моніторингу глобальних та регіональних тенденцій відібрано регулярні продукти й публікації програми «Копернік». Центральним узагальнювальним джерелом слугували матеріали *Copernicus Ocean State Report (OSR8)* як систематична оцінка змін океану на основі поєднання спостережень та реаналізів, із важливою для прикладних цілей інтерпретацією тенденцій і обмежень даних [5]. Для забезпечення відтворюваності та доступу до першоджерел використано офіційні ресурси CMEMS, зокрема портал і матеріали OSR (як точку доступу до даних та методичних пояснень) [6]. Для чорноморського регіону окремо включено опис і метадані спеціалізованого продукту трендів SST (Black Sea SST trend product), який є релевантним для оцінювання довгострокових змін температурного режиму як одного з ключових кліматичних сигналів [7], а також опис регіонального фізичного аналізу/прогнозу Чорного моря (Black Sea Physics Analysis and Forecast), що відображає стан практик оперативного моделювання та надає основу для подальшого переходу від огляду до кількісних оцінок у наступні роки теми [8]. Для коректної інтерпретації «продуктів трендів» як похідних даних залучено технічну документацію (QUID), яка фіксує методологію формування продукту, QA/QC і межі застосовності [9].

Для характеристики глобального середнього рівня моря як одного з ключових кліматичних індикаторів і для узгодження трактування супутникового періоду залучено інформаційні матеріали NASA щодо ряду GMSL (1993-дотепер) [10] та довідкові пояснення NOAA щодо механізмів змін рівня моря й інтерпретації трендів/прискорення [11]. Додаткову узгоджувальну роль (для порівняння міжрічних особливостей і подійних відхилень на фоні трендів) виконують щорічні узагальнення Всесвітньої метеорологічної організації щодо стану глобального клімату [12].

Зв'язок «глобальні висновки - регіональна специфіка України» забезпечено включенням рецензованих наукових публікацій, виконаних на матеріалі північно-західної частини Чорного моря та підготовлених за участі

українських авторів. Зокрема, для аналізу просторово-часових закономірностей термічного режиму (поєднання інструментальних рядів і дистанційного зондування) використано роботу *Thermal regime of the northwestern part of the Black Sea* [13]. Для інтерпретації довгострокових змін рівня води та сезонної структури мінливості в північно-західній частині Чорного моря використано публікацію *Long-term changes in water level of the northwestern part of the Black Sea* [14]. Ці джерела відібрано як приклади того, як глобальні сигнали (потепління, зміни рівня моря) проявляються в умовах напівзамкненого басейну та які методичні рішення застосовуються на регіональному рівні.

1.2. Критерії якості та надійності

Оцінювання якості джерел здійснювалося за трьома взаємодоповнювальними групами критеріїв: інституційно-методичними, даними-орієнтованими та критеріями відтворюваності висновків. Для міжнародних оціночних документів базовими вважалися інституційна легітимність, прозорість підготовки й експертного узгодження, наявність процедур роботи з невизначеностями та термінологічна/методична узгодженість між випусками [1], [2], [3], [4]. Для щорічних кліматичних підсумків додатковим критерієм була регулярність оновлення та здатність відображати подійні відхилення на фоні довгострокових тенденцій [12].

Для рецензованих наукових публікацій пріоритет надавався роботам, у яких чітко описано джерела даних, методи обробки, підходи до оцінювання трендів і мінливості, а також обмеження застосовності результатів; це забезпечує відтворюваність і придатність для подальшої методичної спадкоємності у межах теми [13], [14]. Для сервісів даних і похідних продуктів (супутникові ряди, реаналізи, трендові продукти) ключовими були

однорідність інструментального періоду, просторове покриття, наявність метаданих, опис процедур QA/QC та явно задекларовані джерела невизначеності [5], [6], [7], [8]. Зокрема, трендові SST-продукти розглядалися лише за умови опори на технічну документацію, що фіксує методологію побудови, межі застосовності та контроль якості [9]. Для індикатора рівня моря перевага надавалася супутниковому періоду як інструментально узгодженій основі порівняння темпів змін, із паралельним використанням довідкових матеріалів, що пояснюють механізми та інтерпретацію трендів (термічне розширення, танення льоду, регіональні відхилення) [10], [11].

Надійність узагальнених висновків перевірялася шляхом зіставлення кількох незалежних ліній доказів: (i) міжнародні оцінки (МОК-ЮНЕСКО, IPCC, WOA II) [1], [2], [3]; (ii) операційні сервіси даних та індикатори (Copernicus/CMEMS, NASA, NOAA, WMO) [5], [6], [7], [10], [11], [12]; (iii) регіональна рецензована література (для Чорного моря) [13], [14]. Висновки, які відтворювалися на всіх трьох рівнях (узагальнення → дані/індикатори → регіональні приклади), трактувалися як такі, що мають підвищений рівень довіри; натомість результати, обмежені короткими рядами, локальними даними або залежні від методичних припущень, позначалися як такі, що потребують уточнення на наступних етапах теми через розширення даних і методів.

1.3. Метод систематизації та узагальнення

Систематизацію матеріалів виконано за принципом багатовимірного тематико-каузального структурування, що забезпечує перехід від узагальнення тенденцій до реконструкції механізмів і далі - до формування підґрунтя для прикладних рекомендацій. На першому кроці джерела групувалися у тематичні блоки за ключовими компонентами кліматично

зумовлених змін у морському середовищі. Блок «потепління океану/морів» формувався на основі міжнародних оцінок і операційних продуктів, з подальшим «приземленням» на чорноморські приклади [1], [2], [5], [7], [13]. Блок «зміни рівня моря» структурувався через поєднання супутникових індикаторів і пояснювальних матеріалів із регіональним аналізом [10], [11], [14]. Блоки «закислення» та «зменшення вмісту розчиненого кисню» формувалися насамперед за міжнародними морськими оцінками та рамковими кліматичними узагальненнями, що описують механізми, тенденції та екологічні наслідки [1], [2], [3]. Блок «екстремальні явища й подійність» структурувався із залученням як кліматичних оцінок, так і щорічних узагальнень стану глобального клімату, що дозволяє коректно розрізнити трендові й міжрічні компоненти [2], [12]. Блок «біота та екосистемні наслідки» узгоджувався через міждисциплінарні оцінки (WOA II) і профільні морські узагальнення (МОК-ЮНЕСКО) [1], [3], із подальшим співвіднесенням з регіональними фізичними передумовами, зафіксованими в чорноморських дослідженнях [13], [14].

На другому кроці результати впорядковувалися за типом впливів у причинно-наслідковій послідовності «фізичні зміни → біогеохімічні зміни → екологічна відповідь → соціально-економічні наслідки». Фізичні зміни (температура, стратифікація, циркуляція, рівень моря) трактувалися як первинні кліматичні сигнали, які визначають рамкові умови для біогеохімічних процесів (карбонатна система, кисневий режим, пов'язані з ними режими продукції), після чого аналізувалися екологічні відповіді (реакції біоти, трофічні зміни, вразливість) і, в підсумку, наслідки для екосистемних послуг та прибережних територій [1], [2], [3]. Для чорноморського контексту ця логіка додатково «прикріплювалася» до конкретних регіональних проявів (тепловий режим, змінність рівня) як емпіричних прикладів першого каскаду («фізика») [13], [14].

На третьому кроці для кожного узагальненого твердження фіксувався рівень доказовості (високий/середній/обмежений), який визначався

комбінацією кількості незалежних підтверджень, якості та тривалості даних, а також наявності узгоджених оцінок невизначеності. Для «рамкових» кліматичних висновків застосовувалася логіка градацій наукової впевненості, характерна для IPCC, із перевіркою узгодженості формулювань із профільними морськими оцінками МОК-ЮНЕСКО та міждисциплінарними оцінками WOA II [1], [2], [3]. Для похідних продуктів (трендові SST-продукти) рівень доказовості визначався з урахуванням метаданих і технічної документації CMEMS (QUID), яка описує методи побудови та контроль якості [7], [9], а також з урахуванням можливих регіональних обмежень прибережної зони [13]. Для рівня моря додатковою умовою було узгодження індикаторів і пояснювальних механізмів між незалежними джерелами NASA та NOAA, із використанням WMO як контексту для подійної мінливості [10], [11], [12]. Такий підхід дозволив не лише узагальнити світовий досвід, а й прозоро зафіксувати межі надійності висновків та сформувати методичний фундамент для наступних етапів теми (2026-2029), орієнтованих на кількісні оцінки та прикладні рекомендації.

2 СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН У ОКЕАНІ ТА МОРЯХ

2.1. Потепління океану: показники, темпи, невизначеності

Потепління океану є одним із найнадійніших і найбільш «інтегральних» проявів сучасних кліматичних змін, оскільки океан акумулює переважну частку додаткової енергії, що надходить у кліматичну систему внаслідок зростання концентрацій парникових газів (рис. 2.1). В оцінках IPCC (AR6, WG1) та у профільних морських узагальненнях МОК-ЮНЕСКО потепління океану розглядається як ключова складова енергетичного дисбалансу Землі, а основним кількісним індикатором виступає теплозапас океану (Ocean Heat Content, ОНС) у верхніх шарах (типово 0-700 м та 0-2000 м) із розширенням аналізу на глибоководні області [2], [1], [30]. Додатковими показниками є температура поверхні моря (SST), просторове поле температурних аномалій, частота та інтенсивність морських теплових хвиль, а також похідні характеристики стратифікації, які опосередковують зміни у вертикальному обміні й біогеохімічних режимах [5], [12], [15].

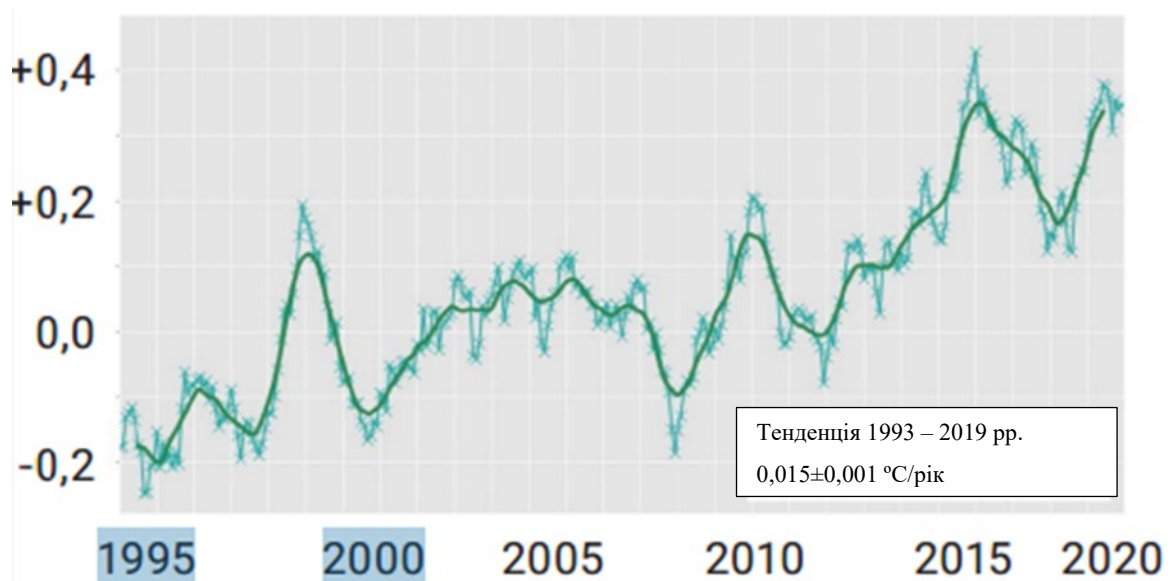


Рисунок 2.1 – Аномалії температури поверхні океану (SST) як індикатор потепління (супутниковий період; приклад узагальненого індикатора в океанічному звіті «Копернік») [5].

Сучасні оцінки демонструють стійке зростання (див. рис. 2.2) ОНС упродовж останніх десятиліть, причому саме теплозапас океану є менш чутливим до короткоперіодних коливань, ніж SST, і тому забезпечує більш «стабільний» трендовий сигнал [16], [17], [2]. Регулярні огляди Copernicus Ocean State Report узгоджують інструментальні спостереження й реаналізи, показуючи прискорення океанічного потепління у другій половині XX - на початку XXI століття та просторову неоднорідність цього процесу [5], [6]. При цьому міжрічна мінливість SST та верхньошарового теплового сигналу (наприклад, через ENSO) може тимчасово підсилювати або послаблювати відхилення, але не змінює висновку про загальну тенденцію накопичення тепла в океані [2], [12].

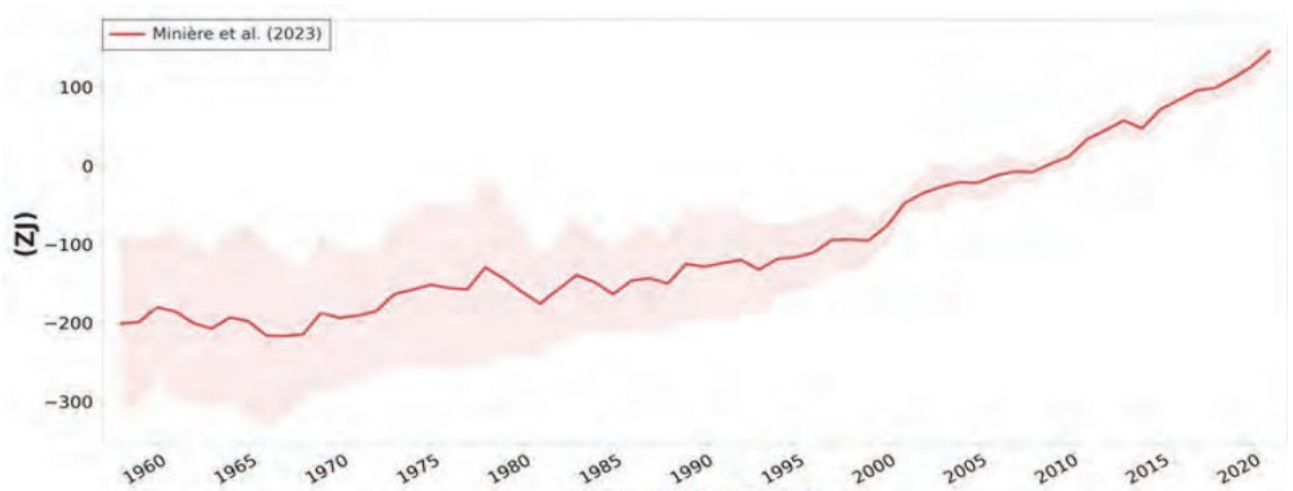


Рисунок 2.2 – Тепловий вміст океану (0–2000 м): багаторічні зміни (індикатор накопичення тепла в океані) [1].

Невизначеності оцінок океанічного потепління мають кілька джерел. По-перше, це неоднорідність історичних спостережних систем: щільність і якість *in situ* даних суттєво змінювалися у часі, а для глибоких шарів і високих широт довгий час існували системні прогалини [2], [17]. По-друге, різні методи реконструкції полів температури (інтерполяція, статистичні схеми заповнення прогалин, злиття супутникових і *in situ* джерел) формують різні оцінки похибки й довірчих інтервалів [2], [5]. По-третє, частина невизначеності пов'язана з розділенням довгострокового тренду та природної мінливості на різних часових масштабах, що особливо важливо при інтерпретації коротких відтинків часу та екстремальних років [12], [2]. У підсумку сучасна доказова база конвергує на висновку, що потепління океану є однозначним, проте його регіональні прояви, вертикальний розподіл тепла та пов'язані з цим екологічні наслідки потребують деталізації на рівні окремих басейнів і прибережних зон у межах подальших етапів досліджень [1], [3], [30].

2.2. Зміни рівня моря

Зростання середнього рівня моря є одним із найважливіших кліматичних індикаторів для прибережних територій, оскільки воно прямо підсилює ризики підтоплення, ерозії, засолення та збільшує шкоду від штормових нагонів. За узагальненнями IPCC та спеціальною доповіддю про океан і кріосферу (SROCC) підняття рівня моря у сучасну епоху обумовлене двома головними механізмами: термічним розширенням океанічної води внаслідок потепління та додатковим надходженням води через втрату маси льодовиків і льодових щитів [18], [15], [2]. Супутникова альтиметрія, що забезпечує інструментально узгоджений ряд спостережень з 1993 року, фіксує стійку тенденцію підвищення глобального середнього рівня моря (GMSL) та ознаки прискорення у межах альтиметричної ери [10], [19].

Операційні довідкові матеріали NASA надають узгоджену візуалізацію й узагальнення супутникового ряду GMSL, що використовується як стандартний індикатор для зіставлення з регіональними оцінками та моделями [10]. Глобальний середній рівень моря за супутниковими альтиметричними спостереженнями (1993–2023) представлений на рис. 2.3.

NOAA додатково підкреслює, що регіональні відхилення від глобального тренду можуть бути значними через зміни циркуляції, вітрового поля, розподілу тепла і солоності, а також через гравітаційні та геодинамічні ефекти, пов'язані з перерозподілом маси льоду [11]. Наукові роботи, що аналізують прискорення зростання рівня моря в альтиметричний період, демонструють, що сигнал прискорення статистично виявляється на фоні міжрічної мінливості, хоча оцінки величини прискорення можуть відрізнятися залежно від методів усунення природної мінливості та вибору періоду аналізу [19], [20].

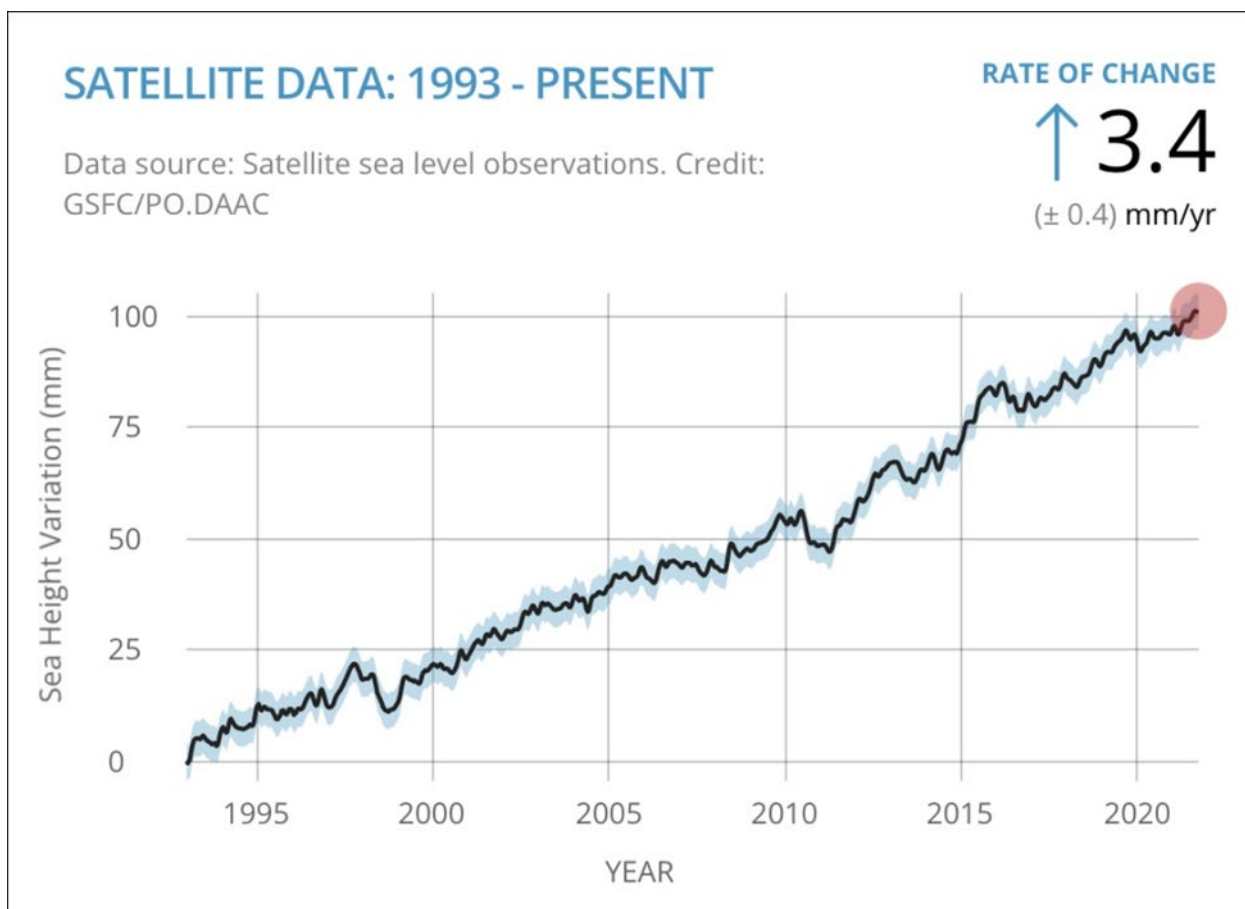


Рисунок 2.3 – Глобальний середній рівень моря за супутниковими альтиметричними спостереженнями (1993–2023) [10].

Для інтерпретації трендів і ризиків принципово важливим є розділення глобального сигналу та локальних чинників. На практиці впливи на рівень моря в конкретному регіоні можуть формуватися комбінацією глобального підняття, регіональних океанографічних процесів, атмосферної циркуляції та змін стоку, а також вертикальних рухів суходолу (осідання/підняття), що визначають відносний рівень моря на берегових постах [11], [18], [15]. Саме тому глобальні оцінки ІРСС та дані альтиметрії доцільно розглядати як «референтну» основу, а регіональні висновки - як похідні від неї з урахуванням локальної специфіки, що є особливо актуальним для напівзамкнених морів [2], [15], [3].

2.3. Океанічне закислення

Океанічне закислення є прямим наслідком поглинання океаном антропогенного CO_2 та зміни карбонатної системи морської води. У міжнародних оцінках воно розглядається як процес, що має глобальний характер, чітку фізико-хімічну причинність і суттєві екологічні наслідки, насамперед для організмів, які формують карбонатні структури (кальцифікатори) [21], [22], [2]. Ключовими показниками для моніторингу закислення є рН, загальна лужність, розчинений неорганічний вуглець, парціальний тиск CO_2 ($p\text{CO}_2$) та ступінь насичення карбонатними мінералами (зокрема арагонітом), який визначає енергетичні витрати на кальцифікацію та стійкість карбонатних структур [21], [22].

Оцінки довгострокових тенденцій рН поверхневого океану базуються на поєднанні інструментальних спостережень, реконструкцій та модельних

узгоджень. Сучасні глобальні компіляції демонструють стійке зниження рН у поверхневому шарі океану упродовж останніх десятиліть, із вираженою просторовою неоднорідністю темпів, зумовленою різницею в температурі, буферній ємності, продукційних процесах та циркуляції [23], [2]. У профільних морських узагальненнях МОК-ЮНЕСКО та міждисциплінарних оцінках Регулярного процесу ООН підкреслюється, що закислення діє не ізольовано, а у взаємодії з потеплінням, деоксигенацією та евтрофікаційними процесами, формуючи комбіновані ризики для екосистем і екосистемних послуг [1], [3].

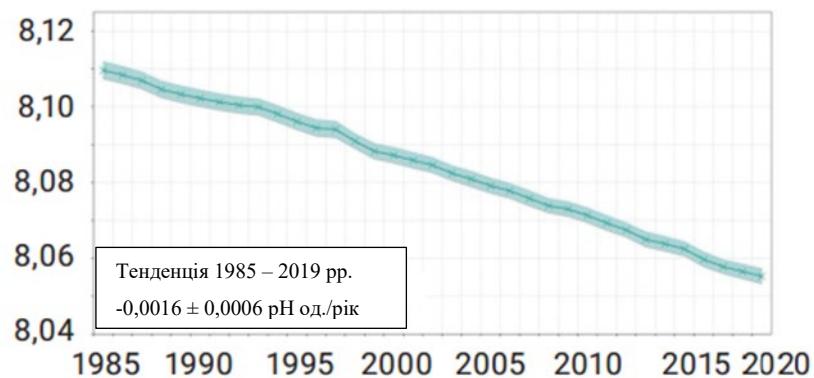


Рисунок 2.4 – Довгострокові тенденції зниження рН поверхневого шару океану (індикатор океанічного закислення) [5].

Невизначеності оцінок закислення пов'язані, з одного боку, з неоднорідністю спостережної мережі та складністю приведення вимірів карбонатної системи до єдиних стандартів, а з іншого - з високою мінливістю прибережних і напівзамкнених морських басейнів, де рН і насичення карбонатами можуть істотно змінюватися під впливом річкового стоку, біологічної продукції, апвелінгу та локальної антропогенної дії [2], [21], [23]. Це має прикладне значення для України, оскільки прибережні води й затоки часто є зонами, де глобальний сигнал накладається на сильну локальну мінливість, і тому потребують спеціалізованих підходів до моніторингу та інтерпретації [1], [3].

2.4. Зменшення вмісту розчиненого кисню

Зниження вмісту розчиненого кисню в океані визнається однією з фундаментальних довгострокових тенденцій, тісно пов'язаною з потеплінням і змінами стратифікації. Механізми деоксигенації включають зменшення розчинності кисню у теплішій воді, послаблення вертикального перемішування та вентиляції, а також зміни біогеохімічного споживання кисню у товщі води [1, 2, 24, 26] (див. рис. 2.5). Глобальні оцінки вказують на зменшення загального вмісту кисню в океані упродовж останніх десятиліть, хоча темпи й просторовий розподіл змін є неоднорідними [24], [26].

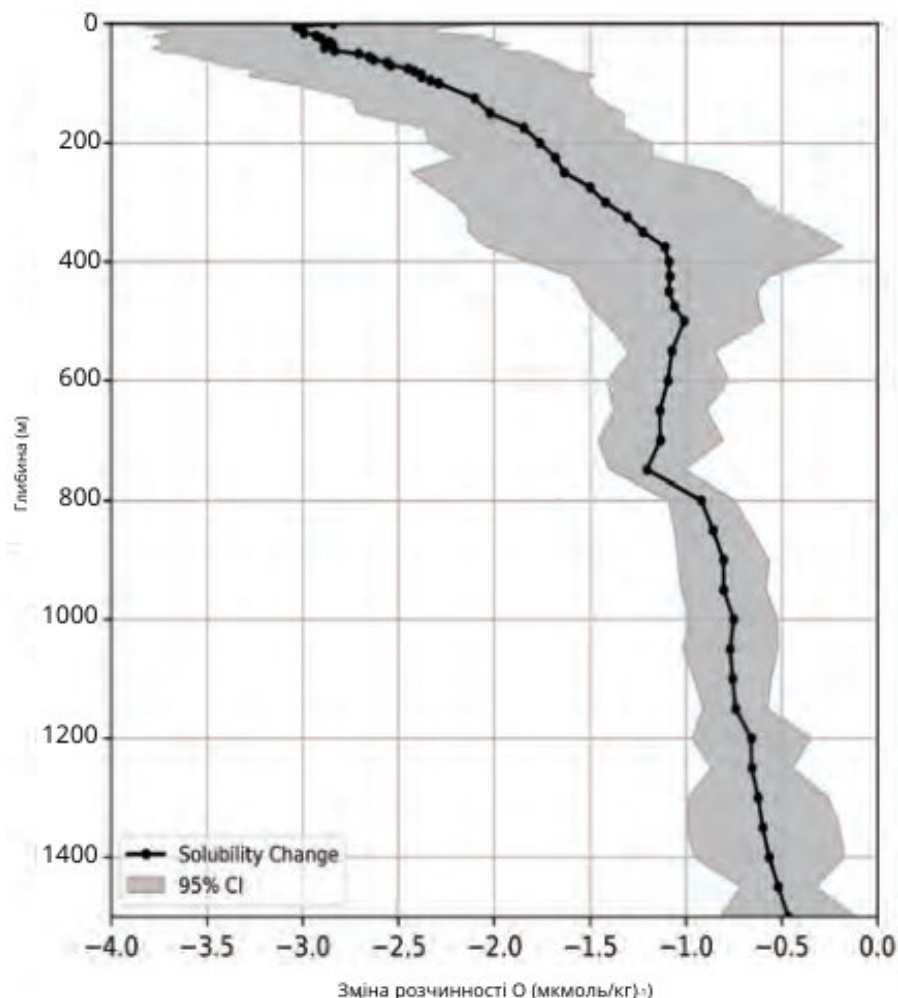


Рисунок 2.5 – Зменшення розчиненого кисню: тенденції у верхньому шарі та на різних глибинах за узагальненими оцінками [1].

Поняття «гарячих точок» деоксигенації охоплює як природні зони мінімуму кисню у відкритому океані, що можуть розширюватися, так і прибережні райони, де додатковим чинником стає евтрофікація, яка стимулює споживання кисню та сприяє розвитку гіпоксії й аноксії [25], [3], [1]. Узагальнення в Science наголошують на екологічних і біогеохімічних наслідках деоксигенації: зміщення ареалів і структури угруповань, порушення трофічних ланцюгів, підвищення смертності та зниження відтворення рибних ресурсів, а також можливе посилення вивільнення деяких відновлених форм елементів у донних і придонних шарах [25], [26]. Для напівзамкнених морів особливо критичною є роль стратифікації та вентиляції, оскільки вони визначають здатність системи до відновлення кисневого режиму в глибших шарах [1], [3], [2].

Невизначеності у глобальних оцінках деоксигенації зумовлені неоднорідністю довгострокових спостережень, різницею між океанічними басейнами, а також складністю розділення кліматичного внеску та локальних антропогенних чинників у прибережній зоні [24], [26], [25]. Водночас узгодженість висновків між незалежними джерелами (Nature, Science, IPCC, МОК-ЮНЕСКО) забезпечує високу довіру до самого факту глобальної тенденції, тоді як локальні прогнози й оцінки ризиків потребують спеціалізованих регіональних даних і моделей [24], [25], [2], [1].

2.5. Зміни в циркуляції, стратифікації, екстремальні явища

Зміни океанічної циркуляції та стратифікації виступають ключовими «медіаторами» між потеплінням і реакцією екосистем, оскільки визначають

вертикальний і горизонтальний перенос тепла, солі, поживних речовин і розчинених газів. Зростання стратифікації, зафіксоване у глобальних аналізах за останні півстоліття, означає послаблення вертикального перемішування у багатьох районах океану, що може зменшувати надходження поживних речовин у фотичний шар у відкритому океані та одночасно погіршувати вентиляцію глибинних шарів, підсилюючи ризики деоксигенації [29], [30], [2]. Саме тому в міжнародних оцінках (IPCC, МОК-ЮНЕСКО) стратифікація розглядається як важлива ланка, що пов'язує фізичні зміни з біогеохімічними та екологічними наслідками [2], [1], [30].

Окрему категорію сучасних кліматичних проявів становлять екстремальні явища в океані, зокрема морські теплові хвилі. Їхнє визначення та класифікація стандартизовані в науковій літературі, що дозволяє порівнювати події між регіонами та оцінювати зміну їхньої частоти й інтенсивності на фоні загального потепління [27]. Дослідження показують, що зі зростанням середніх температур зсувається і розподіл екстремумів, роблячи морські теплові хвилі більш імовірними та, у середньому, інтенсивнішими, що має прямі наслідки для коралових екосистем, морських трав, рибних угруповань і функціонування харчових мереж [28], [15], [1]. Щорічні огляди ВМО також фіксують зростання ролі океанічних екстремумів як складової сучасного кліматичного стану та підкреслюють їхню соціально-економічну значущість [12].

Щодо штормовості та змін вітрохвильового режиму, міжнародні оцінки загалом наголошують на високій регіональній неоднорідності та на суттєвій ролі природної мінливості атмосферної циркуляції, що ускладнює виявлення універсальних глобальних трендів для всіх басейнів [2], [15], [30]. Водночас для прикладних цілей ключовим є не лише питання «середньої штормовості», а й зміни ризику екстремальних подій у поєднанні з підвищенням рівня моря, що підсилює небезпеку штормових нагонів і хвильового впливу на узбережжя навіть без однозначної зміни частоти штормів [11], [18], [15]. У цьому контексті поєднання довгострокових індикаторів (рівень моря, ОНС, SST) з

аналізом екстремумів формує методичну основу для переходу від глобального огляду до оцінювання вразливості конкретних прибережних зон у наступних етапах теми [1], [3], [30].

3 ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА МОРСЬКІ ЕКОСИСТЕМИ: УЗАГАЛЬНЕННЯ СВІТОВОГО ДОСВІДУ

3.1. Типові реакції екосистем

Світовий досвід, узагальнений у матеріалах ІРСС щодо впливів і вразливості океану та прибережних екосистем, свідчить, що кліматичні зміни проявляються в морських системах як через поступові зсуви середніх умов (потепління, зміни стратифікації, режимів циркуляції), так і через посилення екстремальних подій, насамперед морських теплових хвиль, що формують різко виражені «імпульсні» ефекти для біоти й функціонування екосистем [31], [35]. Однією з найтипівіших реакцій є зміна продуктивності, зумовлена перерозподілом тепла і поживних речовин, змінами вертикального обміну та обмежувальних факторів у фотичному шарі. У ряді регіонів спостерігаються зсуви у структурі первинної продукції та «ефективності» трофічного переносу, що далі відбивається на складі угруповань і трофічних ланцюгах [31], [33].

Зміни фенології розглядаються як системна й широко задокументована відповідь морських організмів на потепління: зміщуються терміни сезонних піків розвитку фітопланктону, періоди нересту, міграцій і нагулу, що призводить до фенологічних «розузгоджень» між трофічними рівнями (наприклад, між піком кормової бази та критичними фазами розвитку личинок риб) [32], [33]. Паралельно відбувається просторове переформатування ареалів: багато видів демонструють полярне й/або батиметричне зміщення (у бік більших глибин або вищих широт) як відповідь на зміну температурних ніш, що є одним із найбільш відтворюваних глобальних сигналів у морській біогеографії [32], [34]. Такі перерозподіли нерідко змінюють співвідношення «місцевих» і «теплолюбних» таксонів та створюють нові конфігурації угруповань, у яких традиційні міжвидові взаємодії та трофічні зв'язки можуть послаблюватися або перебудовуватися [34], [31].

Важливою складовою є посилення ризику біологічних інвазій та «натуралізації» немісцевих видів унаслідок потепління і збільшення частоти екстремальних теплових подій. Кліматично зумовлене розширення «кліматично придатних» зон підвищує ймовірність закріплення прибулих видів та змінює конкурентний баланс, що, у поєднанні з інтенсивними транспортними шляхами, робить інвазії більш імовірними та потенційно більш впливовими для екосистемної структури й функцій [31], [33], [34]. Морські теплові хвилі при цьому можуть виступати «тригерами» різких екосистемних зсувів, після яких відновлення до попереднього стану є повільним або неповним [35].

3.2. Біогеохімічні наслідки

Кліматичні зміни впливають на біогеохімічні режими морів як безпосередньо (через температуру, стратифікацію та вентиляцію водних мас), так і опосередковано - через модифікацію продукційних процесів, деструкції органічної речовини та переносу поживних елементів. Одним із найбільш значущих і практично чутливих проявів є посилення ризиків гіпоксії та інших форм кисневого дефіциту. Узагальнення глобальних даних демонструють тенденцію до зниження вмісту кисню у відкритому океані та прибережних водах, при цьому механізми включають зменшення розчинності кисню з ростом температури, послаблення вертикального перемішування і вентиляції, а також зростання біохімічного споживання кисню в товщі води [37], [31]. Для прибережних районів підкреслюється синергетичний характер взаємодії кліматичних чинників із евтрофікацією: потепління та стратифікація можуть підсилювати тривалість і стійкість гіпоксичних станів, тоді як надлишок поживних речовин збільшує продукцію та подальшу мінералізацію органіки, що споживає кисень [37], [31].

Біогеохімічні зсуви відображаються у перебудові трофічних ланцюгів. Зміни первинної продукції, розмірної структури планктону та просторового розподілу «гарячих зон» продукції змінюють доступність кормових ресурсів для вищих трофічних рівнів, а фенологічні розузгодження можуть знижувати ефективність переносу енергії від нижчих трофічних рівнів до промислово важливих видів [32], [33], [31]. Окремо наголошується, що екстремальні теплові події здатні викликати швидкі зсуви у домінуванні функціональних груп і «перемикання» екосистемних станів, що змінює як біогеохімічні потоки, так і стійкість системи до подальших збурень [35], [31].

3.3. Вплив на біорізноманіття та ключові групи організмів

Вплив кліматичних змін на морське біорізноманіття проявляється як у зміні видового складу та просторової структури угруповань, так і у зміні функціонального різноманіття та ролі ключових інженерних видів і біотопів. Загальною закономірністю є перерозподіл біорізноманіття у просторі, що змінює «центри» видового багатства та локальну унікальність угруповань, а також модифікує взаємодії між видами й трофічні зв'язки [34], [31]. У багатьох регіонах зафіксовано зростання частоти «теплолюбних» таксонів та ослаблення позицій видів холоднішої ніші, що, однак, не є нейтральною заміною, оскільки різні види мають різні екологічні функції та забезпечують різні компоненти екосистемних послуг [34], [31].

Морські теплові хвилі визначаються як один з найбільш небезпечних чинників для біорізноманіття, оскільки здатні спричиняти масову смертність, руйнування біотопів та довготривалі зсуви у структурі угруповань. Зокрема, наголошується на вразливості біотопів, що формуються ключовими інженерними видами (макрофіти, корали, біогенні рифи), а також на непрямих ефектах через порушення трофічних зв'язків і зміни конкурентних взаємин

[35], [31]. Окремий блок ризиків пов'язаний із закисненням океану, яке змінює параметри карбонатної системи та ускладнює кальцифікацію у частини організмів; у світовій літературі підкреслюється, що закиснення може діяти як «множник стресу» у поєднанні з потеплінням, гіпоксією та іншими чинниками, підсилюючи уразливість чутливих груп і потенційно змінюючи структуру біотичних спільнот [38]. Таким чином, сучасний світовий досвід свідчить, що впливи клімату на біорізноманіття є комплексними, часто нелінійними, і вимагають розгляду одночасно довгострокових трендів та екстремальних подій як взаємопов'язаних драйверів змін [31], [35], [34].

3.4. Ризики для екосистемних послуг

Кліматично зумовлені зміни екосистем безпосередньо трансформують надання екосистемних послуг, що має практичне значення для економіки, безпеки та добробуту прибережних громад. Для рибальства ключовим проявом є перерозподіл ресурсної бази у просторі та зміна потенціалу вилову: моделювання й глобальні оцінки демонструють, що під впливом потепління та пов'язаних із ним змін продукції й трофічної структури відбувається перерозподіл «потенціалу максимального вилову», нерідко зі зміщенням у бік вищих широт і зі зростанням нерівномірності між регіонами [39], [31]. Аналітика FAO підкреслює, що ці зрушення накладаються на існуючі проблеми управління промислами та стан запасів і потребують адаптаційних підходів, включно з гнучкішими режимами управління, посиленням моніторингу та врахуванням кліматичних ризиків у плануванні [40].

Рекреаційні послуги залежать від якості морського середовища, стабільності прибережних ландшафтів та екологічного стану прибережних біотопів. Кліматичні зміни можуть погіршувати рекреаційну привабливість через посилення екстремальних явищ, підвищення ризиків гіпоксії,

погіршення умов для чутливих біотопів і зміну біотичного складу, що впливає на прозорість води, частоту небажаних екологічних явищ та загальне сприйняття стану узбережжя [31], [35]. Окремий блок становить берегозахисна функція екосистем, що реалізується через природні бар'єри та «інженерні» властивості прибережних екосистем (зокрема, роль рослинних угруповань та інших біотопів у демпфуванні хвильової енергії, стабілізації донних відкладів і підтримці морфодинамічної рівноваги). Світові оцінки вартості та значущості прибережних екосистемних послуг показують, що їхній внесок у зменшення ризиків берегових руйнувань є економічно відчутним і, як правило, недооціненим у традиційних підходах до інфраструктурного планування [41]. У зв'язку з цим ІРСС наголошує на необхідності розглядати збереження й відновлення прибережних екосистем як частину адаптаційного портфеля, який доповнює інженерні рішення та підсилює стійкість прибережних територій [31].

У підсумку, світовий досвід підтверджує, що кліматичні зміни впливають на морські екосистеми через поєднання поступових трендів і екстремальних подій, а наслідки проявляються як у біофізичних характеристиках екосистем, так і в трансформації екосистемних послуг. Це створює підстави для системного підходу до оцінювання ризиків і адаптації, де ключовими є інтеграція даних, урахування взаємодій між чинниками та орієнтація на практичні наслідки для суспільства й економіки [31], [40].

4 ДАНІ ТА СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

4.1. Основні глобальні та регіональні програми і платформи даних

Світова практика океанічних і морських спостережень базується на поєднанні мереж *in situ* вимірювань, дистанційного зондування та модельних/реаналізних продуктів, а також на інфраструктурах, що забезпечують уніфікацію метаданих, контроль якості та довготривале збереження даних. Координаційною «надбудовою» для значної частини оперативних мереж виступає OceanOPS як міжнародний центр підтримки й моніторингу стану *in situ* систем (буї Argo, дрейфери, буйкові платформи, океанічні станції тощо), що дає прозору картину покриття, відстеження функціонування та узгодження практик між мережами [42], [43].

Порівняльна характеристика ключових *in situ* мереж GOOS за показниками реалізації, потоків даних, кращих практик і сфер застосування наведено на рис. 4.1.

| GOOS <i>in situ</i> networks ¹ | Implementation Status ² | Data & metadata | | | Best practices ⁶ | GOOS delivery areas ⁷ | | |
|--|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------|-----------------|
| | | Real time ³ | Archived delayed mode ⁴ | Metadata ⁵ | | Operational services | Climate | Ocean health |
| Ship based meteorological - SOT | ★★ | ★★ | ★★ | ★★★ | ★★ | 🇺🇸 | 🌍 | |
| Ship based oceanographic - SOT | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★ | ★★★ | 🇺🇸 | 🌍 | |
| Repeated transects - GO-SHIP | ★★★ | Not applicable | ★★★ | ★★ | ★★★ | | 🌍 | 🌊 |
| Sea level gauges - GLOSS | ★★★ | ★★ | ★★★ | ★ | ★★ | 🇺🇸 | 🌍 | |
| Time series sites - OceanSITES | ★★ | Not applicable | ★★★ | ★ | ★★ | | 🌍 | 🌊 |
| Coastal moored buoys - DBCP | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★ | ★★★ | 🇺🇸 | 🌍 | 🌊 |
| Tsunami buoys - DBCP | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★ | ★★★ | 🇺🇸 | | |
| Tropical moored buoys - DBCP | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★ | 🇺🇸 | 🌍 | 🌊 |
| HF radars | ★★ | ★★ | ★ | ★ | ★★★ | 🇺🇸 | 🌍 | |
| Drifting buoys - DBCP | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | 🇺🇸 | 🌍 | |
| Profiling floats - Argo | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | 🇺🇸 | 🌍 | |
| Deep & biogeochemistry floats - Argo | ★★ | ★★ | ★★ | ★★ | ★★ | 🇺🇸 | 🌍 | 🌊 |

Рисунок 4.1 – Порівняльна характеристика ключових *in situ* мереж GOOS за показниками реалізації, потоків даних/метаданих, кращих практик і сфер застосування [1].

Серед ключових глобальних мереж фізичних спостережень центральне місце посідає Argo, яка надає стандартизовані профілі температури й солоності через глобальні центри збирання (GDAC) із відкритим доступом та узгодженими форматами і прапорцями контролю якості [44], [45]. Важливим напрямом є Biogeochemical-Argo, що розширює спостереження на біогеохімічні змінні (зокрема, кисень, хлорофіл-а, оптичні показники тощо) і формує основу зіставних оцінок біогеохімічної мінливості на глобальному масштабі [46]. Для довгих високочастотних часових рядів у відкритому океані використовується мережа OceanSITES, яка забезпечує тривалі спостереження ключових фізичних та, у багатьох випадках, біогеохімічних параметрів, придатні для аналізу екстремальних подій, сезонності та довготривалих змін [47], [48]. Для «кліматично-еталонних» суднових гідрографічних розрізів існує GO-SHIP, а доступ і повторне використання даних підтримуються спеціалізованими сервісами на кшталт CCHDO [49], [50].

Архівні та інтеграційні середовища представлені, зокрема, World Ocean Database (WOD) як одним з найбільш повних агрегованих наборів океанографічних профільних даних із документацією та правилами використання [51], [52]. У європейському просторі релевантними є EMODnet (Physics, Chemistry та ін.) як тематичні портали, що забезпечують стандартизований доступ до *in situ* даних і продуктів із фокусом на гармонізацію, валідацію та повторне використання [53], [54]. Для біологічних даних ключовими є OBIS як глобальна платформа агрегування відомостей про поширення морських організмів [56], а також WoRMS для таксономічної узгодженості [57] і стандарт Darwin Core для структурування наборів даних [58]. Для біогеохімії вуглецевого циклу та споріднених змінних фундаментальними є інтегровані продукти GLODAPv2 [65] і SOCAT [66], а для батиметрії як базового геопросторового шару - GEBCO [64].

У контексті Чорного моря окреме значення має регіональна інфраструктура обміну даними - Black Sea e-Platform, яка функціонує на базі

УкрНЦЕМ і виконує роль інтеграційного середовища для акумуляції, систематизації та надання доступу до даних і продуктів, релевантних для регіонального моніторингу та оцінювання стану морського довкілля. Її місце в екосистемі спостережень доцільно трактувати як «регіональний вузол» (hub), що може забезпечувати зіставлення національних і проєктних даних із міжнародними потоками та стандартами (зокрема, за логікою EMODnet/Argo/WOD) і тим самим підвищувати відтворюваність та доказовість висновків для України.

4.2. Узагальнені прогалини спостережень

Попри суттєвий розвиток глобальних систем, прогалини спостережень залишаються системними. Для фізичних змінних мережі мають відносно високе покриття у відкритому океані, однак для прибережної зони й напівзамкнених морів характерні неоднорідність та розриви часових рядів, що ускладнює відокремлення довготривалих трендів від міжрічної мінливості; моніторинг фактичного покриття через OceanOPS є одним із способів об'єктивізації цих прогалин [42], [43].

Найбільш відчутні прогалини стосуються біогеохімічних параметрів. Хоча розвиток Biogeochemical-Argo та високоточних GO-SHIP вимірювань істотно покращив ситуацію, біогеохімічні спостереження залишаються більш дорогими, методично складними й менш щільними у просторі й часі, ніж фізичні [46], [49], [50]. Для карбонатної системи й показників CO₂ глобальні продукти (GLODAPv2, SOCAT) формують критичну базу, однак їхня прикладна придатність для прибережних процесів залежить від наявності локальних вимірювань і густини регіональних спостережень [65], [66]. Для кисневого режиму та гіпоксії найбільш критичними є прибережні й шельфові ділянки, де процеси мають високу мінливість і часто потребують

високочастотних часових рядів (роль OceanSITES як еталонних точок) [47], [48]. Для біологічних даних проблема полягає не лише в нерівномірності обстежень, але й у різномірності протоколів та метаданих; навіть за наявності агрегаторів (OBIS) потрібні таксономічна нормалізація (WoRMS) і коректне структурування (Darwin Core), інакше інтеграція з фізико-біогеохімічними рядами буде обмеженою [56], [57], [58].

У цьому контексті Black Sea e-Platform, функціонуючи як регіональний вузол, є інструментом «зменшення прогалів не лише даних, а й сумісності»: вона може забезпечувати акумуляцію розрізнених наборів, їхню уніфікацію за термінами/метаданими, фіксацію якості та прозорий доступ, що особливо важливо для біогеохімії і біоти, де дисперсність джерел і неоднаковість опису є найбільшою.

4.3. Вимоги до якості даних

Для перетворення спостережень на придатні до політик і звітності докази вирішальними є вимоги до якості як поєднання стандартів метаданих, процедур QA/QC та форматної сумісності. Концептуальною рамкою є принципи FAIR [60], які вимагають формалізованих метаданих, сталих ідентифікаторів наборів, прозорих умов використання та технічної інтероперабельності. Для геопросторових даних базовим є стандарт ISO 19115-1 [61], а для океанографічних наборів - використання NetCDF із метаданими за конвенціями CF, що робить дані самодокументованими й машинозчитуваними [59]. Узгодження термінології параметрів і платформ забезпечується контрольованими словниками, зокрема через NERC Vocabulary Server [55]. Для біологічних даних аналогічні функції виконують Darwin Core та WoRMS [58], [57].

Контроль якості включає як відкладений (delayed-mode), так і оперативний (real-time) компоненти. Для потоків реального часу одним із найбільш поширених підходів є QARTOD, що задає логіку тестів, прапорців і процедур документування якості океанографічних даних [62]. Репозиторії «кращих практик», такі як Ocean Best Practices System, формують методичну основу уніфікації протоколів і сприяють відтворюваності [63]. Для України, з урахуванням існування Black Sea e-Platform, вимоги до якості варто розглядати не як «додаткове оформлення», а як функціональне ядро платформи: саме стандартизовані метадані, QC-логіка та контрольована термінологія перетворюють платформу на інструмент зіставності та довіри до даних.

4.4. Висновки для українського контексту

Для України практичний висновок зі світового досвіду спостережень полягає в тому, що наступні роки теми потребуватимуть не лише накопичення даних, а формування інтегрованої, зіставної та аудитованої доказової бази. Критично важливо забезпечити сумісність українських даних зі стандартами метаданих і форматів (ISO 19115-1; CF/NetCDF), застосовувати контрольовані словники параметрів (NVS) і впровадити прозору QA/QC-логіку (зокрема, сумісну з QARTOD) [61], [59], [55], [62]. Протоколи та процедури доцільно формалізувати і підтримувати як «кращі практики» з опорою на OBPS, щоб забезпечити відтворюваність та можливість незалежного контролю якості [63], [60].

З огляду на пріоритети спостережень, світова логіка підказує, що фізичні параметри є необхідною, але недостатньою основою; для прибережних морів України визначальним стає нарощування біогеохімічного блоку (кисень, карбонатна система, поживні речовини та проксі продуктивності), оскільки

саме тут глобальні бази і продукти мають найбільші «прогалини», а локальні процеси формують найбільші ризики для екосистем і послуг [46], [54], [65], [66]. У частині біоти критичною є стандартизація структури й таксономії даних та їхня інтеграція у сумісні потоки (Darwin Core, WoRMS, OBIS) [58], [57], [56].

Black Sea e-Platform, що функціонує на базі УкрНЦЕМ, у цьому контексті має бути інституційним механізмом реалізації зазначених вимог: вона може забезпечувати централізований облік наборів, гармонізацію метаданих, впровадження QC-процедур, версіонування продуктів та узгоджений доступ для користувачів і партнерів. За умови методично коректної інтеграції з міжнародними підходами (Argo/OceanSITES/GO-SHIP як еталони організації *in situ* даних; WOD/EMODnet як моделі архівування і доступу; FAIR/CF/ISO/QARTOD як стандарти якості) платформа може стати ключовим інструментом для переходу від «фрагментарних» даних до системної оцінки кліматичних змін і їхніх наслідків у морському довкіллі України [44]-[52], [53], [54], [59]-[63].

ВИСНОВКИ

Упродовж звітного року виконано аналітичний огляд і узагальнення міжнародно визнаного світового досвіду та даних щодо проявів кліматичних змін в океані й морях, а також щодо механізмів, через які ці зміни трансформують фізичний стан морського середовища, біогеохімічні процеси та екосистемні реакції. Отримано систематизовану доказову базу, яка забезпечує узгоджене тлумачення ключових понять, індикаторів і причинно-наслідкових зв'язків, необхідних для подальших кількісних оцінок, прогнозування та розроблення адаптаційних рекомендацій для України.

Проведене узагальнення підтвердило, що сучасні кліматично зумовлені зміни в океані та морях мають багатокomпонентний характер і проявляються через взаємопов'язані процеси, які формують інтегральний кліматичний сигнал морського середовища. До таких процесів належать потепління поверхневих і глибинних вод та накопичення тепла у водній товщі, що змінює стратифікацію, вертикальний обмін і режими перемішування; підвищення середнього рівня моря з тенденцією до прискорення під впливом теплового розширення води та танення льодовикових і крижаних мас; довготривала зміна карбонатної системи морської води внаслідок зростання поглинання антропогенного вуглекислого газу, що відображається у зниженні рН та зміні насичення карбонатними мінералами; зниження вмісту розчиненого кисню в товщі води й посилення ризиків дефіциту кисню у прибережних та напівзамкнених морських районах; а також зростання ролі екстремальних явищ, зокрема морських теплових хвиль, аномальних штормових режимів та інших епізодів, здатних спричинити різкі, інколи незворотні зсуви в екосистемах. Узгоджено, що ці компоненти не є ізольованими: вони взаємно підсилюють один одного, а сукупний вплив визначається як сумою трендів, так і нелінійною реакцією системи на екстремуми.

На основі аналізу світового досвіду встановлено типову причинно-наслідкову логіку перетворення кліматичного сигналу в екологічні наслідки, яка є придатною як універсальна рамка для подальшого застосування в українському контексті. Первинні фізичні зміни - температура, стратифікація, циркуляція, хвильовий і рівневий режими - задають базові обмеження й умови для перебігу біогеохімічних процесів, зокрема для кисневого режиму, циклів поживних речовин і параметрів карбонатної системи. Біогеохімічні зсуви визначають зміни у продукційних характеристиках, структурі трофічних ланцюгів, фенології та просторових межах існування видів. У підсумку це трансформує стан біорізноманіття, функціональну структуру угруповань і стійкість екосистем, а також впливає на екосистемні послуги, що мають соціально-економічне значення для прибережних територій. Таким чином, закладено методичну основу для переходу від опису трендів і явищ до оцінювання ризиків для екосистем і суспільства, що є критично важливим для формування адаптаційних політик.

У звітному році зроблено висновок про ключову роль якості й повноти спостережень у доведенні та кількісному описі кліматичних змін у морському середовищі. Підтверджено, що глобальні та регіональні системи спостережень забезпечують достатньо надійну основу для оцінювання фонових тенденцій фізичних параметрів у відкритому океані, проте для прибережної зони та напівзамкнених морів характерними залишаються суттєві прогалини. Найбільш критичними з погляду вразливості та управлінської значущості є прогалини саме у біогеохімічному та біологічному блоці. Для прибережних морів питання дефіциту кисню, зміни продуктивності, трансформації трофічних ланцюгів, стан карбонатної системи та реакції біоти часто не можуть бути коректно оцінені виключно за глобальними продуктами без підтримки локальних довготривалих рядів. Відповідно, для України визначено необхідність системного зміщення акцентів від суто фізичного моніторингу до інтегрованих програм, які одночасно охоплюють фізичні, біогеохімічні та

біологічні параметри, забезпечуючи міжкомпонентну інтерпретацію причин і наслідків.

Окремо обґрунтовано, що підвищення доказовості висновків у наступні роки теми неможливе без стандартизації даних, метаданих та процедур контролю якості. Сформульовано вимогу, що спостереження мають супроводжуватися повним описом методів отримання, калібрування та контролю якості, чітко визначеними просторово-часовими атрибутами, а також відтворюваними правилами обробки і версіонування похідних продуктів. Узгоджено, що сумісність даних між різними джерелами й програмами має забезпечуватися не постфактум, а закладатися на етапі планування та збирання, включно з уніфікацією термінології параметрів, структур наборів і принципів документування. Це визначено як передумова для інтеграції українських даних у міжнародні потоки та для коректного використання міжнародних продуктів у національних оцінках.

У межах висновків 2025 року окреслено інституційно-технічне значення регіональної інфраструктури управління даними для Чорного моря, яка функціонує на базі УкрНЦЕМ. Сформульовано, що така платформа має виконувати роль регіонального вузла для акумуляції, систематизації та узгодженого доступу до даних і продуктів, пов'язаних із моніторингом і оцінюванням стану морського довкілля. Її цінність визначається не лише накопиченням інформації, а здатністю забезпечувати стандартизовані метадані, процедури контролю якості, прозоре версіонування продуктів і відтворюваність аналітичних результатів. У практичному сенсі це створює передумови для переходу від розрізнених наборів і проєктних фрагментів до довготривалої інституційної пам'яті даних, необхідної для виявлення трендів, аналізу екстремальних подій та оцінювання ефективності заходів адаптації.

Підсумовуючи результати першого року виконання теми, визначено, що головним здобутком 2025 року є сформована узгоджена рамка знань, індикаторів і вимог до даних, яка забезпечує логічний перехід до прикладних етапів у 2026-2029 роках. На цій основі обґрунтовано, що подальша робота має

зосереджуватися на кількісних оцінках для морського довкілля України, включно з аналізом трендів і мінливості ключових кліматичних індикаторів у Чорному морі, ідентифікацією найбільш уразливих компонентів екосистем і прибережних територій, формуванням сценарних оцінок ризиків та розробленням рекомендацій щодо адаптаційних заходів. При цьому пріоритетами визначено нарощування біогеохімічних та екосистемних спостережень, забезпечення їхньої методичної та форматної сумісності, розвиток інфраструктури даних як основи для довготривалого моніторингу та інтегрованого аналізу, а також підготовку підґрунтя для практичної реалізації портфеля адаптаційних рішень у сфері охорони морського довкілля та управління прибережними територіями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- [1] IOC-UNESCO. *State of the Ocean Report*. Paris: IOC-UNESCO, 2024 (IOC Technical Series, 190). DOI: 10.25607/4wbg-d349.
- [2] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.
- [3] United Nations (Regular Process). *The Second World Ocean Assessment (WOA II), Volumes I-II*. United Nations, 2021. <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789216040062>
- [4] United Nations (Regular Process / DOALOS). *Brief on the Second World Ocean Assessment and relevant United Nations Decades (climate change & marine environment)*. https://www.un.org/regularprocess/sites/www.un.org.regularprocess/files/second_revised_brief_clean_doalos_ola_un_decades_brief_-_revised_-_to_states_igos_0.pdf
- [5] von Schuckmann, K., Moreira, L., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karstensen, J., Neukermans, G. (Eds.). *8th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR8)*. State Planet, 4-osr8, 2024. DOI: 10.5194/sp-4-osr8. <https://sp.copernicus.org/articles/4-osr8/>
- [6] Copernicus Marine Service (CMEMS). *Ocean State Report (OSR) - 8th issue: portal and materials*. (Електронний ресурс CMEMS). <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-state-report/ocean-state-report-8>
- [7] Copernicus Marine Service (CMEMS). *Black Sea SST trend product (1982-2024): BLKSEA_OMI_TEMP_SAL_sst_trend - Product description*. data.marine.copernicus.eu/product/BLKSEA_OMI_TEMP_SAL_sst_trend/description
- [8] Copernicus Marine Service (CMEMS). *Black Sea Physics Analysis and Forecast: BLKSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_007_001 - Product description*. data.marine.copernicus.eu/product/BLKSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_007_001/description
- [9] Pisano, A. et al. *Quality Information Document (QUID) for CMEMS Black Sea SST trend OMI product*. (Технічна документація продукту). <https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-OMI-QUID-BLKSEA-SST.pdf>
- [10] NASA Goddard Space Flight Center. *Global Mean Sea Level 1993-2023* (візуалізація/узагальнення супутникового ряду). svs.gsfc.nasa.gov/5221/

- [11] NOAA Climate.gov. *Climate Change: Global Sea Level* (довідковий матеріал з поясненням супутникового ряду та ключових показників). www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level
- [12] World Meteorological Organization (WMO). *State of the Global Climate 2024*. WMO-No. 1368, 2025. wmo.int/sites/default/files/2025-03/WMO-1368-2024_en.pdf
- [13] Vyshnevskiy, V., Matygin, A., Komorin, V. *Thermal regime of the northwestern part of the Black Sea*. *Geographia Technica*, 18(1), 29-38, 2023. DOI: 10.21163/GT_2023.181.03.
- [14] Vyshnevskiy, V., Dykhanov, Y., Komorin, V. *Long-term changes in water level of the northwestern part of the Black Sea*. *Geographia Polonica*, 97(4), 473-484, 2024. DOI: 10.7163/GPol.0288.
- [15] IPCC. *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. www.ipcc.ch/srocc/
- [16] Cheng, L., Abraham, J., Hausfather, Z., Trenberth, K.E. How fast are the oceans warming? *Science*, 363(6423), 128-129, 2019. DOI: 10.1126/science.aav7619.
- [17] von Schuckmann, K., Cheng, L., Palmer, M.D., et al. Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth System Science Data*, 12, 2013-2041, 2020. DOI: 10.5194/essd-12-2013-2020.
- [18] Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., et al. Sea Level Change. In: IPCC AR6 WG1 (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896. (розділ/глава в межах [2], наводиться як окремий бібліографічний запис для тематичної прив'язки до 2.2)
- [19] Nerem, R.S., Beckley, B.D., Fasullo, J.T., Hamlington, B.D., Masters, D., Mitchum, G.T. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 115(9), 2022-2025, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1717312115.
- [20] Cazenave, A., Llovel, W. Contemporary sea level rise. *Annual Review of Marine Science*, 2, 145-173, 2010. DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081105.

[21] Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A., Kleypas, J.A. Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192, 2009. DOI: 10.1146/annurev.marine.010908.163834.

[22] Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681-686, 2005. DOI: 10.1038/nature04095.

[23] Jiang, L.-Q., Carter, B.R., Feely, R.A., Lauvset, S.K., Olsen, A. Surface ocean pH and aragonite saturation state from 1982 to 2018: global trends and variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 33, 2019. DOI: 10.1029/2019GB006251.

[24] Schmidtko, S., Stramma, L., Visbeck, M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 542, 335-339, 2017. DOI: 10.1038/nature21399.

[25] Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240, 2018. DOI: 10.1126/science.aam7240.

[26] Oschlies, A., Brandt, P., Stramma, L., Schmidtko, S. Drivers and mechanisms of ocean deoxygenation. *Nature Geoscience*, 11, 467-473, 2018. DOI: 10.1038/s41561-018-0152-2.

[27] Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238, 2016. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.12.014.

[28] Frölicher, T.L., Fischer, E.M., Gruber, N. Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560, 360-364, 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0383-9.

[29] Li, G., Cheng, L., Zhu, J., Trenberth, K.E., Mann, M.E., Abraham, J.P. Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nature Climate Change*, 10, 1116-1123, 2020. DOI: 10.1038/s41558-020-00918-2.

[30] Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., et al. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: IPCC AR6 WG1 (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.

- [31] IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Chapter 3: Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. Cambridge University Press, 2022/2023. DOI: 10.1017/9781009325844.005.
- [32] Poloczanska, E.S., Burrows, M.T., Brown, C.J., et al. Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 2013. DOI: 10.1038/nclimate1958.
- [33] Poloczanska, E.S., Burrows, M.T., Richardson, A.J., et al. Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans. *Frontiers in Marine Science*, 2016. DOI: 10.3389/fmars.2016.00062.
- [34] Pecl, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 2017. DOI: 10.1126/science.aai9214
- [35] Smale, D.A., Wernberg, T., Oliver, E.C.J., et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 2019. DOI: 10.1038/s41558-019-0412-1.
- [36] Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 2016. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.12.014.
- [37] Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 2018. DOI: 10.1126/science.aam7240.
- [38] Doney, S.C., Busch, D.S., Cooley, S.R., Kroeker, K.J. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, 45:83-112. DOI: 10.1146/annurev-environ-012320-083019.
- [39] Cheung, W.W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., et al. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*, 2010, 16(1):24-35. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01995.x.
- [40] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action. Rome: FAO, 2024. DOI: 10.4060/cd0683en.

[41] Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. *Ecological Monographs*, 2011, 81:169-193. DOI: 10.1890/10-1510.1.

[42] WMO Community. Marine Observations (OceanOPS as IOC-WMO in situ programme support centre; linkage to GOOS/WIGOS/WIS). <https://community.wmo.int/en/activity-areas/marine-weather-climate/marine-observations>

[43] OceanOPS. Ocean Observing System Report Card 2021. <https://www.ocean-ops.org/board.php?board=reportcard>

[44] Argo. Data from GDACs (Global Data Assembly Centers): access to the complete Argo data collection and formats/QC flags. <https://argo.ucsd.edu/data/data-from-gdacs/>

[45] Argo Data Management. Documentation (GDAC cookbooks; file checks; data formats; QA/QC and interoperability guidance). <https://argo.ucsd.edu/data/argo-data-management/>

[46] Biogeochemical-Argo. Data Access (BGC-Argo data through GDACs; access rules and identifiers). <https://biogeochemical-argo.org/data-access/>

[47] OceanOPS / OceanSITES. OceanSITES: Taking the Pulse of the Global Ocean (мережа довгострокових відкритоокеанських станцій; високочастотні часові ряди). <https://www.ocean-ops.org/board.php?board=oceansites>

[48] OceanSITES. What is OceanSITES (узагальнювальний документ про призначення, змінні та принципи організації часових рядів). <https://www.oceansites.org/what-is-oceansites/>

[49] GO-SHIP. International Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program (програма повторних гідрографічних розрізів; «кліматична якість» вимірювань). <https://www.go-ship.org/>

[50] U.S. GO-SHIP (UC San Diego). Cruise Data: submit & download (портал доступу до даних розрізів і супутніх вимірювань). <https://cchdo.ucsd.edu/>

[51] NOAA/NCEI (Ocean Climate Laboratory). World Ocean Database: Documentation (керівництва користувача та доступу до профільних даних). <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>

[52] Garcia, H.E., et al. World Ocean Database 2023: User's Manual. NOAA (NCEI), 2024. https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2024-XX/wod23_users_manual.pdf

[53] EMODnet Physics. Single point of access to in situ ocean physics time-series and vertical profiles; common standards; open access. <https://emodnet.ec.europa.eu/en/physics>

[54] EMODnet Chemistry. EMODnet Chemistry portal: standardized, harmonised, validated marine chemical data collections and products. <https://emodnet.ec.europa.eu/en/chemistry>

[55] NERC Vocabulary Server (NVS). SeaDataNet controlled vocabularies (collection portal; machine-readable governance of terms). <https://vocab.nerc.ac.uk/>

[56] Ocean Biodiversity Information System (OBIS). Global open-access system for marine species occurrence/abundance data; tools and services. <https://obis.org/>

[57] WoRMS Editorial Board. World Register of Marine Species (WoRMS). DOI: 10.14284/170. <https://www.marinespecies.org/>

[58] TDWG. Darwin Core Terms (стандарт термінів для обміну даними про біорізноманіття). <https://dwc.tdwg.org/terms/>

[59] CF Conventions. NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions (актуальна версія; принципи самодокументованості та контрольованих словників). <https://cfconventions.org/>

[60] Wilkinson, M.D., et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3:160018, 2016. DOI: 10.1038/sdata.2016.18. <https://www.nature.com/articles/sdata201618>

[61] ISO. ISO 19115-1:2014 Geographic information - Metadata. <https://www.iso.org/standard/53798.html>

[62] U.S. IOOS (NOAA). QARTOD (Quality Assurance/Quality Control of Real-Time Oceanographic Data): проєкт і базові настанови/мануали. <https://ioos.noaa.gov/project/qartod/>

[63] Ocean Best Practices System (OBPS). OBPS Repository (глобальне сховище «кращих практик» для океанічних спостережень і даних). <https://www.oceanbestpractices.org/>

[64] GEBCO. Gridded Bathymetry Data (GEBCO_2025 Grid): глобальна модель рельєфу океану/суходолу; типи джерел даних (TID). https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

[65] Olsen, A., et al. The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2) - an internally consistent data product for the world ocean. *Earth System Science Data*, 8, 297-323, 2016. DOI: 10.5194/essd-8-297-2016. <https://essd.copernicus.org/articles/8/297/2016/>

[66] Bakker, D.C.E., et al. Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) gridded data products. *Earth System Science Data*, 5, 145-153, 2013. DOI: 10.5194/essd-5-145-2013. <https://essd.copernicus.org/articles/5/145/2013/>