



Funded by
the European Union



The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future - Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Модуль 1. Вплив глобального потепління на якість води та вплив на аквакультуру

Доц. Доктор Анжеліка Даутарте
Університет Вітаутаса Великого

Вступ

Підвищення глобальної температури внаслідок зміни клімату суттєво впливає на водні екосистеми, зокрема на процеси метаболізму та росту водних видів. Підвищення температури прискорює швидкість метаболізму, збільшуючи потребу водних організмів у кисні, що може призвести до проблем з ростом і репродукцією. У цьому розділі досліджується взаємозв'язок між змінами температури та фізіологічними процесами водних організмів, що дає уявлення про те, як ця динаміка впливає на якість води та здоров'я екосистем. Зміна клімату також глибоко впливає на прибережні та естуарійні екосистеми, причому коливання солоності стають критичним наслідком. Танення полярних льодовиків і зміна структури опадів значною мірою сприяють зміні рівня солоності, особливо в регіонах, розташованих поблизу притоків прісної води. Ці коливання створюють виклики для водних організмів, які залежать від стабільних умов солоності, змінюючи динаміку екосистем і загрожуючи біорізноманіттю (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Зміни солоності, спричинені зміною клімату, ще більше руйнують морські екосистеми. Коливання солоності, спричинені таненням полярних льодів, зміною режиму опадів та збільшенням інтенсивності випаровування, впливають на розподіл морських видів, знижуючи біорізноманіття та ускладнюючи ведення аквакультури. Надходження поживних речовин із сільськогосподарськими стоками, промисловими викидами та забрудненням у містах посилює евтрофікацію, що призводить до шкідливого цвітіння водоростей (ВЦВ), виснаження кисню та серйозних порушень морських і прісноводних екосистем. Евтрофікація, що набуває все більшого поширення через антропогенний вплив та зміну клімату, має широкомасштабні екологічні та економічні наслідки (Zhang та ін., 2024; Mensah та ін., 2025).

Доступність та якість води все частіше опиняються під загрозою через подвійний тиск зміни клімату та людської діяльності. Посухи та дефіцит води, що посилюються підвищенням температури та непередбачуваним характером опадів, змінюють гідрологічні цикли на глобальному рівні. Водночас, погіршення якості води через забруднення та неефективне управління створює значні виклики для екосистем і населення (DeNicola та ін., 2015; Moussa та ін., 2025). Глобальне потепління також створює виклики для аквакультури, змінюючи умови навколишнього середовища, важливі для водних видів. З підвищенням температури води багато видів намагаються процвітати за межами своїх оптимальних температурних діапазонів, що призводить до зниження врожайності та збільшення смертності. Крім того, тепліші води створюють ідеальні умови для патогенів і паразитів, посилюючи ризики для аквакультури



(DeNicola та ін., 2015; Moussa та ін., 2025). Ці взаємопов'язані проблеми суттєво впливають на стійкість та прибутковість аквакультури.

Глобальне потепління змінює географічний розподіл зон аквакультури. Підвищення температури моря, зміщення океанських течій та зміна структури опадів змінюють придатність традиційних регіонів аквакультури. Ці зміни вимагають стратегічних адаптацій, таких як перенесення виробництва в нові придатні зони, а також протистояння викликам, які створюють інвазивні види, що процвітають у змінених умовах і руйнують природні екосистеми. Ці порушення мають значні соціально-економічні та екологічні наслідки, що вимагають негайної уваги з боку політиків, дослідників та зацікавлених сторін.

2. Вплив глобального потепління на якість води

2.1. Термічна стратифікація та виснаження кисню у водних екосистемах

Механізми теплової стратифікації та кисневого виснаження.

Термічна стратифікація відбувається, коли різниця в температурі води створює окремі шари у водоймі. Цей процес посилюється глобальним потеплінням, оскільки підвищення температури поверхні посилює поділ між теплішою, легшою поверхневою водою та холоднішою, щільнішою глибинною водою. Ці шари перешкоджають вертикальному перемішуванню, обмежуючи низхідний рух кисню і висхідний рух поживних речовин. Як наслідок, рівень кисню в глибоких водах знижується, що призводить до гіпоксії або аноксичних умов, які серйозно впливають на морські екосистеми (Bhuiyan et al., 2024; Burke et al., 2022).

Виснаження кисню особливо помітне в районах зі слабкою вентиляцією та високим рівнем розкладання органічних речовин. Наприклад, у східній частині тропічної частини Тихого океану та Аравійському морі є великі зони мінімального вмісту кисню (ЗМНК), де рівень розчиненого кисню нижче 20 мкмоль/л, що охоплюють глибини від 100 до 1000 метрів. Ці регіони підкреслюють взаємодію між повільною океанічною циркуляцією, розпадом органічної речовини та обмеженим поповненням кисню (Bhuiyan et al., 2024).

Regional and Global Trends.

З 1960 року вміст кисню в світовому океані зменшився приблизно на 2%. Ця тенденція пов'язана з посиленням стратифікації, евтрофікацією та потеплінням. Прибережні регіони, включаючи Мексиканську затоку і Чесапікську затоку, зазнали значного розширення гіпоксичних зон, які зазвичай називають «мертвими зонами». Ці зони значною мірою зумовлені стоком поживних речовин, який сприяє цвітінню водоростей, що призводить до збільшення розкладання органічної речовини та споживання кисню (Bhuiyan et al., 2024). Супутникові моделі надають цінну інформацію про динаміку розчиненого кисню, показуючи, як коливання температури та солоності корелюють з рівнем кисню. Наприклад, регіони, що зазнають впливу апвелінгу, такі як Каліфорнійська течія, демонструють вищу мінливість кисню через взаємодію багатих на поживні речовини холодних вод і біологічної продуктивності (Sundararaman & Shanmugam, 2024).



Impacts on Marine Life.

Виснаження кисню безпосередньо впливає на водні види, зменшуючи зони проживання та змінюючи динаміку екосистеми. Найбільше страждають сидячі організми та придонна фауна, оскільки вони не можуть вижити в умовах низького вмісту кисню. Риба та рухливі безхребетні стикаються зі стисненням середовища існування, що змушує їх оселятися в більш мілких, багатих на кисень шарах, а це збільшує конкуренцію та ризик хижацтва. Крім того, тривала гіпоксія може порушити розмноження і ріст, що призводить до скорочення популяцій комерційно важливих видів (Burke et al., 2022; Sundararaman & Shanmugam, 2024).

Стратегії пом'якшення наслідків.

1. Покращений моніторинг: Досягнення в галузі дистанційного зондування та біогеохімічних моделей надають дані в режимі реального часу про динаміку кисню та поживних речовин, допомагаючи на ранньому етапі виявляти гіпоксичні стани.
2. Управління поживними речовинами: Зменшення сільськогосподарських стоків та впровадження сталих методів ведення сільського господарства може пом'якшити евтрофікацію та пов'язане з нею виснаження кисню.
3. Системи оксигенації: В аквакультурі такі технології, як впорскування рідкого кисню та системи аерації, застосовуються для пом'якшення стресу від низького рівня кисню на рибних фермах, але з перемінним успіхом, залежно від умов навколишнього середовища (Burke et al., 2022).
4. Пом'якшення наслідків зміни клімату: Усунення першопричин глобального потепління шляхом скорочення викидів вуглецю має вирішальне значення для зміни тенденцій стратифікації та збереження морського біорізноманіття (Bhuiyan et al., 2024).

Підвищення температури, метаболізм та зміни росту

Швидкість метаболізму та потреба в кисні

Вищі температури безпосередньо впливають на швидкість метаболізму у водних організмів, що призводить до збільшення споживання кисню для задоволення підвищених енергетичних потреб. Дослідження показують, що температурно-залежна гіпоксія становить значну проблему, оскільки доступність кисню зменшується з підвищенням температури, тим самим обмежуючи аеробні можливості організмів (Seibel, 2024). Наприклад, метаболічний індекс демонструє, що постачання кисню стає недостатнім для задоволення потреб за вищих температур, обмежуючи ріст і розмноження (Deutsch et al., 2020).

Риби є особливо вразливими, оскільки підвищена швидкість метаболізму вимагає більшого споживання кисню, чого важко досягти в теплих водах зі зниженою розчинністю кисню. Цей фізіологічний стрес не лише гальмує ріст, але й впливає на рівень виживання, особливо для видів, що мешкають на мілководді або в термічно стратифікованих середовищах (Okon et al., 2024).

Проблеми зростання та репродуктивного здоров'я

Підвищення температури суттєво змінює траєкторії росту та репродуктивні цикли водних видів. Для багатьох риб тепліші води призводять до більш раннього дозрівання, але коротшої тривалості життя, порушуючи динаміку популяції та екосистемний баланс (Liu et al., 2024). Крім того, підвищені температури можуть погіршити якість гамет і успішність нересту, знижуючи репродуктивну продуктивність. Наприклад, види в північно-західній частині



Тихого океану демонструють зміни у своїх репродуктивних стратегіях як пряму реакцію на зміну термічних режимів, що підкреслює глибокий вплив температури на особливості життєвого циклу (Liu et al., 2024).

Вплив на здоров'я екосистеми

Каскадні ефекти змін метаболізму та росту поширюються на здоров'я екосистеми в цілому. Підвищення швидкості метаболізму призводить до більшого поглинання поживних речовин і виділення відходів, що може посилити евтрофікацію в багатих на поживні речовини водах. Крім того, тепловий стрес може послабити імунні реакції, роблячи види більш вразливими до патогенів і хвороб, як це спостерігається в глобальних системах аквакультури (Okon et al., 2024). Ці взаємодії підкреслюють гостру потребу в інтегрованих стратегіях управління для пом'якшення кліматичних стресів, що впливають на водні екосистеми.

Адаптивне реагування та стратегії пом'якшення наслідків

Водні види демонструють різний ступінь фенотипової пластичності, щоб впоратися з тепловим стресом. Наприклад, евригальні види пристосовують свої осморегуляторні механізми до підвищеної солоності та температурних коливань (Esbaugh, 2025). Однак масштаби таких адаптацій обмежені енергетичними обмеженнями, що підкреслює важливість проактивних заходів для пом'якшення температурних впливів.

Ефективні стратегії включають відновлення прибережної рослинності для затінення водойм і зменшення теплового навантаження, а також посилення потоку води в стратифікованих системах для покращення розподілу кисню. Крім того, глобальні зусилля зі скорочення викидів парникових газів залишаються важливими для усунення першопричин підвищення температури, спричиненого кліматичними змінами (Seibel, 2024).

1.3 Підкислення океану

Рівні pH та підкислення океану

Поглинання океанами вуглекислого газу (CO_2) є основним чинником підкислення океану, що спричиняє помітне зниження рівня pH. Починаючи з доіндустріальної епохи, pH поверхневого шару океану знизився приблизно на 0,1 одиниці, що відповідає збільшенню концентрації іонів водню на 26% (Duarte et al., 2022). Це підкислення відбувається внаслідок з'єднання CO_2 з морською водою з утворенням вугільної кислоти, яка дисоціює на бікарбонат та іони водню, знижуючи pH і зменшуючи доступність карбонатних іонів (Grabba et al., 2024). Іони карбонату необхідні для кальцифікуючих організмів, таких як молюски та корали, для побудови та підтримки їхніх структур карбонату кальцію. Зменшення доступності карбонатів пов'язане з більш тонкими, слабкими мушлями та зменшенням цілісності скелета у морських видів (Андрєєва та ін., 2024).

Вплив на морське життя

Підкислення океану серйозно впливає на кальцифікуючі організми, які особливо чутливі до змін стану насиченості карбонатами. Лабораторні дослідження двостулкових молюсків, таких як мідії та устриці, демонструють, що знижений рівень pH перешкоджає формуванню мушлі, затримує розвиток і підвищує смертність на ранніх стадіях життя (Hamilton et al., 2022). Наприклад, мідія *Mytilus galloprovincialis* продемонструвала стійкість до низьких значень pH,



але все одно зазнає підвищеного пошкодження мушлі та зниження темпів росту в підкислених умовах (Andreyeva et al., 2024). Такі фізіологічні стреси ставлять під загрозу виживання та продуктивність цих видів як у природних біотопах, так і в системах аквакультури.

Підкислення океану також впливає на некальцифіковані види, змінюючи сенсорні функції, ріст і розмноження. Поведінкові зміни, такі як зменшення уникнення хижаків та зміна вподобань щодо середовища існування, спостерігаються у риб та безхребетних в умовах низького рівня рН (Grabba et al., 2024). Крім того, підкислення в поєднанні з іншими стресовими факторами, такими як гіпоксія, посилює ці негативні наслідки, що призводить до комбінованого впливу на морське біорізноманіття (Андрєєва та ін., 2024).

Економічні та екологічні наслідки

Економічні наслідки підкислення океану є глибокими, особливо для галузей, що залежать від кальцифікуючих організмів. Рибальство та аквакультура молюсків стикаються зі значними проблемами, оскільки прогнозуються втрати виробництва та ринкової вартості через погіршення якості мушлі та рівня виживання (Mangi et al., 2018). У Сполученому Королівстві економічні втрати, пов'язані з підкисленням океану, можуть становити від 14% до 28% чистої теперішньої вартості рибного господарства за сценаріїв з високим рівнем викидів (Mangi et al., 2018). Цей економічний тиск підкреслює нагальність вирішення проблеми підкислення для захисту морських ресурсів і засобів до існування.

З екологічної точки зору, порушення морських харчових мереж є критичною проблемою. Зменшення популяцій кальцифікуючих організмів може мати каскадний вплив на динаміку відносин «хижак-жертва», кругообіг поживних речовин і загальну стабільність екосистеми (Duarte et al., 2022). Інтегровані підходи, такі як мультитрофічні системи аквакультури, продемонстрували перспективність у пом'якшенні цих впливів шляхом використання морських водоростей для буферизації рівня рН і підтримки кальцифікуючих видів (Hamilton et al., 2022).

Стратегії пом'якшення наслідків зміни клімату та перспективи на майбутнє

Вирішення проблеми підкислення океану вимагає скоординованих глобальних зусиль зі скорочення викидів CO₂ та впровадження адаптивних стратегій. Відновлення луків морської трави та мангрових заростей може підвищити стійкість узбережжя, поглинаючи CO₂ і забезпечуючи притулок для морських організмів (Hamilton et al., 2022). Крім того, вдосконалення практик аквакультури з використанням методів буферизації рН, таких як використання морських водоростей, може пом'якшити вплив підкислення на вирощування молюсків (Hamilton et al., 2022).

Довгостроковий моніторинг і дослідження мають важливе значення для розуміння багатогранних наслідків підкислення та розробки ефективної політики. Посилення міжнародного співробітництва та інтеграція наукових результатів у політичні рамки, такі як Кун'ямінсько-Монреальська глобальна рамкова програма з біорізноманіття, мають вирішальне значення для пом'якшення наслідків підкислення та захисту морського біорізноманіття (Grabba et al., 2024).



1.1. Зміни солоності води

Механізми, що зумовлюють зміни солоності

Основними чинниками коливань солоності є приплив прісної води від танення льодовиків, збільшення кількості опадів і сезонні коливання річкового стоку. Наприклад, у північній частині Аляски надходження прісної води зі зледенілих водозборів спричиняє значні сезонні та просторові коливання солоності. Ці зміни додатково модулюються вітровим перемішуванням і прибережними течіями, які впливають на розподіл шлейфів прісної води (Reister et al., 2024). Аналогічно, Берингове море зазнало значного опріснення через зменшення виробництва морського льоду і збільшення обсягів талої води, що призвело до ослаблення стратифікації і зрушень у кругообігу поживних речовин (Mensah et al., 2025).

Вплив на морські та естуарні організми

Організми, що мешкають в естуаріях та прибережних регіонах, дуже чутливі до коливань солоності. Для видів, що залежать від стабільної солоності, таких як молюски та певні популяції риб, зміни солоності можуть порушити фізіологічні процеси, включаючи осморегуляцію, ріст і розмноження (Guimbeau et al., 2024). Наприклад, дослідження в Бангладеш показали, що підвищений вплив солоності в критичні періоди розвитку призводить до затримки росту у дітей, що підкреслює більш широкі соціально-екологічні наслідки змін солоності (Guimbeau et al., 2024).

Естуарійні системи, такі як Чесапікська затока, стикаються з комбінованим стресом від збагачення поживними речовинами та зміни солоності. Підвищення рівня солоності пов'язане зі зменшенням видового різноманіття та зміною складу угруповань, оскільки менш толерантні види замінюються пристосуванцями (Zhang et al., 2024). Таке зменшення біорізноманіття має каскадний вплив на стабільність харчової мережі та екосистемні послуги.

Ширші екологічні та соціально-економічні наслідки

Колівання солоності впливають не лише на біорізноманіття, але й на продуктивність прибережного рибальства та аквакультури. Наприклад, проникнення солоної води в прісноводні системи зменшує доступність середовищ існування, придатних для прісноводних і солонуватих видів. В аквакультурі коливання солоності ускладнює підтримання оптимальних умов, впливаючи на ріст і виживання культивованих видів (Mensah et al., 2025).

Крім того, ці зміни посилюють існуючу вразливість прибережних громад. Зниження продуктивності сільського господарства в таких регіонах, як дельта Гангу-Брахмапутра, пов'язане із засоленням зрошувальної води, що підкреслює соціально-економічні наслідки коливань солоності (Guimbeau et al., 2024).

Стратегії пом'якшення наслідків та адаптації

Подолання наслідків коливань солоності вимагає інтегрованих стратегій управління. Відновлення прибережної рослинності, такої як мангрові зарості та морські трави, може буферизувати зміни солоності, стабілізуючи відкладення та покращуючи утримання води. Крім того, покращене моделювання притоку прісної води і динаміка засолення може слугувати основою для адаптивних методів управління, таких як модифікація графіків зрошення та вибір солестійких сортів сільськогосподарських культур (Zhang et al., 2024).



У більш широкому масштабі скорочення викидів парникових газів має важливе значення для пом'якшення основних рушійних сил зміни клімату. Інвестиції в глобальні системи моніторингу та плани адаптації на рівні громад можуть ще більше підвищити стійкість до змін засолення у вразливих регіонах (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

1.5 Вплив змін солоності океанічної води на розподіл морських видів

Mechanisms of Salinity-Induced Distribution Shifts

Коливання солоності зумовлені насамперед припливом прісної води, таненням льодовиків і зміною структури опадів. Наприклад, прибережні регіони поблизу естуаріїв зазнають значних коливань солоності через сезонні та кліматичні зміни (Guimbeau et al., 2024). В естуаріях Західної Австралії гіперсолоність розвивається, коли приплив прісної води зменшується, а випаровування перевищує надходження води, що змушує види мігрувати в менш солоні райони або стикатися зі скороченням популяції (Hoeksema et al., 2023).

Морські організми демонструють різну толерантність до змін солоності, що впливає на їх поширення. Евригальні види, здатні адаптуватися до широких діапазонів солоності, домінують в районах з мінливою солоністю. Натомість стеногальні види, які потребують стабільних рівнів солоності, часто відступають у рефугіуми або зазнають скорочення чисельності, коли солоність відхиляється від оптимального рівня (Rahman & Hung, 2024).

Вплив на поширення видів та аквакультуру

Зміни солоності суттєво змінюють просторовий розподіл морських видів. Наприклад, глибоководна рожева креветка *Parapenaeus longirostris* у Середземному морі змістив свій ареал у відповідь на потепління і засолення, а його популяції перемістилися на північ і глибше, щоб уникнути менш сприятливих умов (Mingote et al., 2024). Ці зміни порушують місцеві екосистеми та рибальство, змінюючи динаміку відносин між хижаком і здобиччю та доступність ресурсів.

Аквакультура також стикається з проблемами через мінливість солоності. Такі види, як корюшка, чутливі до солоності під час розмноження, демонструють знижену рухливість сперматозоїдів та успішність запліднення в умовах неоптимальної солоності. Це впливає на роботу інкубаторів та сталість практики аквакультури (Rahman & Hung, 2024). У Бангладеш прогресуюче засолення обмежило продуктивність аквакультури та призвело до зростання соціально-економічної вразливості прибережних громад (Guimbeau et al., 2024).

Ширші екологічні та соціально-економічні наслідки

Зрушення у розподілі видів, спричинені солоністю, мають каскадний вплив на екосистемні послуги. Зміни у складі угруповань впливають на кругообіг поживних речовин, первинну продукцію та стабільність морських харчових мереж (Hoeksema et al., 2023). Наприклад, коли в естуаріях розвивається гіперсолоність, чисельність видів, що мешкають в естуаріях, зменшується, що призводить до зменшення біорізноманіття та зміни функціонування екосистем.

З економічної точки зору, рибальство, що залежить від певних видів, стикається з невизначеністю, оскільки цільові популяції мігрують у менш доступні райони. Це спостерігалось в Середземному морі, де зміни солоності та температури вплинули на



доступність економічно цінних видів, таких як рожева креветка (Mingote et al., 2024). Крім того, коливання солоності створюють проблеми для аквакультури, що вимагає інвестицій в адаптивну інфраструктуру та практики для пом'якшення впливу на виробництво.

Стратегії пом'якшення наслідків та майбутні напрямки

Подолання впливу змін солоності на розподіл морських видів вимагає інтегрованих стратегій управління. Зусилля мають бути зосереджені на скороченні викидів парникових газів для пом'якшення наслідків зміни клімату та стабілізації екологічних умов. Відновлення прибережної рослинності, такої як мангрові зарості та морські трави, може буферизувати зміни солоності та забезпечити середовище існування для морських організмів (Guimbeau et al., 2024).

Аквакультура може отримати вигоду від технологічних інновацій, таких як рециркуляційні системи аквакультури (RAS) та селективне розведення солесітких видів. Удосконалені моделі моніторингу та прогнозування змін солоності також можуть слугувати основою для стратегій адаптивного управління, забезпечуючи стійкість аквакультури та рибальства до викликів, спричинених засоленістю (Rahman & Hung, 2024).

1.6. Навантаження поживними речовинами та евтрофікація

Механізми навантаження поживними речовинами та евтрофікації

Надлишок поживних речовин, зокрема азоту і фосфору, потрапляє у водні системи через стік з сільськогосподарських угідь, міські стічні води та промислові стоки. Ці поживні речовини сприяють росту фітопланктону і водоростей, що призводить до цвітіння водоростей, які, розкладаючись, знижують рівень кисню (Reister et al., 2024). У Мексиканській затоці навантаження поживних речовин з басейну річки Міссісіпі створило одну з найбільших гіпоксичних зон у світі, що впливає на рибальство та біорізноманіття (Day et al., 2024).

Зміна клімату посилює навантаження поживних речовин через збільшення кількості опадів та екстремальних погодних явищ, які збільшують стік поживних речовин у водні об'єкти. Підвищення температури також сприяє евтрофікації, прискорюючи ріст водоростей і змінюючи динаміку екосистем (Mensah et al., 2025). Ці комбіновані ефекти збільшують частоту і тривалість ВЦВ, які вивільняють токсини, шкідливі для морського життя і здоров'я людини (Zhang et al., 2024).

Вплив евтрофікації

Евтрофікація глибоко впливає на водні екосистеми, порушуючи харчові ланцюги та зменшуючи біорізноманіття. Виснаження кисню, або гіпоксія, змушує рибу та безхребетних мігрувати або гинути, тоді як придонні біотопи страждають від аноксії донних відкладів (Reister et al., 2024). Наприклад, дослідження в Чесапікській затоці виявили значне скорочення рибних популяцій через повторювані гіпоксичні явища (Zhang et al., 2024).

ВЦВ створюють додаткові проблеми, виробляючи токсини, які впливають на морські організми та людські популяції. Такі види, як *Karenia brevis* та *Microcystis aeruginosa* пов'язані з Перекладено з масової загибелі риби, забруднення молюсків та респіраторних захворювань у людей (Mensah et al., 2025). Економічні збитки від ВЦВ є значними, особливо для рибальства, туризму та охорони здоров'я.



Стратегії пом'якшення наслідків

Ефективне пом'якшення наслідків надходження поживних речовин та евтрофікації вимагає інтегрованого управління водозборами та політичних заходів. Зменшення сільськогосподарського стоку за допомогою сталих сільськогосподарських практик, таких як покривні культури, буферні зони та точне внесення добрив, може значно зменшити надходження поживних речовин (Reister та ін., 2024). Міські території можуть отримати вигоду від передових технологій очищення стічних вод, які видаляють надлишок поживних речовин перед скиданням.

Відновлення водно-болотних угідь і прибережних зон пропонує природні рішення шляхом фільтрації поживних речовин і поліпшення якості води. Крім того, громадська освіта та політичні реформи, включаючи правила управління поживними речовинами та стимули для впровадження сталих практик, мають вирішальне значення для усунення першопричин евтрофікації (Day et al., 2024).

1.7 Засухи, дефіцит та погіршення якості води

Рушійні сили посух та дефіциту води

Посухи насамперед спричинені кліматичними змінами, зокрема зменшенням кількості опадів і підвищенням температури, які посилюють випаровування. Діяльність людини, зокрема нераціональний забір води та деградація земель, ще більше посилює ці природні явища (Zussa et al., 2021). Наприклад, у таких посушливих регіонах, як Саудівська Аравія, десятиліття надмірного видобутку підземних вод і погані практики зрошення виснажили критичні водоносні горизонти, посиливши наслідки природного дефіциту води (DeNicola et al., 2015).

Зміна клімату посилює ці виклики, змінюючи структуру опадів, що призводить до частіших і сильніших посух. Особливо вразливими є країни Ради співробітництва арабських держав Перської затоки (РСАДПЗ), для яких характерний гіперзасушливий клімат. Швидка урбанізація і зростання населення в цих регіонах збільшують попит на воду, що призводить до виснаження і без того обмежених ресурсів. Для вирішення цих проблем були прийняті інноваційні стратегії, такі як переробка стічних вод і опріснення води, але вони залишаються енергоємними і обтяжливими для довкілля (Moussa et al., 2025).

Вплив погіршення якості води

Погіршення якості води часто збігається з її дефіцитом, оскільки обмежені ресурси дедалі більше забруднюються сільськогосподарськими стоками, промисловими викидами та міськими стічними водами. Наприклад, надмірне навантаження поживних речовин у річкових басейнах призводить до евтрофікації, шкідливого цвітіння водоростей і гіпоксичних умов, які порушують водні екосистеми і загрожують біорізноманіттю (Giri, 2021). У Саудівській Аравії екстремальні погодні явища, пов'язані зі зміною клімату, посилюють забруднення води, вносячи патогени та забруднювачі у джерела прісної води (DeNicola et al., 2015).

Соціально-економічні наслідки погіршення якості води є глибокими. Погана якість води ускладнює процеси очищення, збільшує витрати і підриває здоров'я населення. У всьому світі хвороби, що передаються через забруднену питну воду, є основною причиною захворюваності



та смертності, особливо в громадах з низьким рівнем доходу (Giri, 2021). У країнах РСАДПЗ скорочення сільськогосподарського виробництва, спричинене дефіцитом води, загрожує продовольчій безпеці, що ілюструє каскадний ефект проблем з якістю води (Moussa et al., 2025).

Стратегії пом'якшення наслідків

Вирішення подвійної проблеми посухи та погіршення якості води вимагає комплексних підходів, що поєднують технологічні інновації, політичні реформи та залучення громадськості. Практики сталого управління водними ресурсами, такі як збір дощової води та ефективні іригаційні системи, мають важливе значення для зменшення залежності від надмірно експлуатованих джерел води (Moussa et al., 2025). Відновлення природних екосистем, таких як водно-болотні угіддя, може покращити якість води шляхом фільтрації забруднювачів і регулювання гідрологічних циклів (Zucca et al., 2021).

Досягнення в технології опріснення та очищення стічних вод пропонують потенційні рішення для регіонів з дефіцитом води. Однак ці технології повинні впроваджуватися на сталій основі, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище і забезпечити доступність для вразливих верств населення. Міжнародна співпраця та розбудова потенціалу мають вирішальне значення для обміну знаннями та ресурсами для вирішення водних проблем у глобальному масштабі (DeNicola та ін., 2015).

2. Вплив глобального потепління на вразливість видів аквакультури

Чутливість до температури та вразливість видів

Водні види залежать від стабільної температури води для фізіологічних і метаболічних процесів. Відхилення від оптимального діапазону може погіршити ріст, розмноження та виживання. Наприклад, тропічні види, такі як креветки та тилапія, особливо вразливі до коливань температури, які порушують ферментативну активність та ефективність метаболізму (Giri, 2021). Дослідження показують, що тривалий вплив температур, які виходять за межі толерантності виду, може призвести до спричиненої стресом смертності та зниження врожайності аквакультури (DeNicola et al., 2015).

У таких регіонах, як Аравійський півострів, де температура води зростає швидше, ніж у середньому по світу, аквакультура стикається з додатковими проблемами. Вищі температури не лише знижують рівень розчиненого кисню, але й підвищують токсичність аміаку, що ще більше загрожує здоров'ю водних організмів (Moussa et al., 2025). Ці наслідки підкреслюють необхідність адаптивних заходів, таких як селективна селекція термостійких видів та розвиток систем аквакультури, що регулюють теплове середовище.

Хвороби та розповсюдження паразитів

Тепліша температура води прискорює життєві цикли патогенів і паразитів, що призводить до частіших і сильніших спалахів. Наприклад, хвороби, спричинені **Vibrio* spp.* та паразитами, такими як морський воші процвітають за підвищених температур, спричиняючи значні економічні втрати в аквакультурі (Zucca et al., 2021). Зростання поширеності цих загроз було зафіксовано на креветочних фермах у Південно-Східній Азії та лососевих фермах у Північній



Атлантиці, де підвищення температури поверхні моря сприяло поширенню інфекційних захворювань (DeNicola et al., 2015).

Взаємозв'язок між температурою і динамікою захворювань ще більше ускладнюється кліматичними змінами хімічного складу води, такими як підкислення і зміна солоності. Ці фактори можуть послабити резистентність хазяїна, роблячи види більш сприйнятливими до інфекцій (Giri, 2021). Таким чином, ефективне управління хворобами в аквакультурі вимагає поєднання вдосконалених систем моніторингу, заходів біобезпеки та досліджень стійких до хвороб штамів.

Стратегії пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації

Подолання впливу глобального потепління на аквакультуру вимагає проактивних та комплексних стратегій. Технологічні інновації, такі як рециркуляційні системи аквакультури (RAS) та ставки з контрольованою температурою, можуть пом'якшити тепловий стрес для водних видів (Moussa et al., 2025). Крім того, впровадження програм вакцинації та вдосконалення технологій виявлення хвороб може допомогти в управлінні ризиками, пов'язаними з патогенами.

Політики та зацікавлені сторони також повинні надавати пріоритет збереженню навколишнього середовища для стабілізації екосистем. Наприклад, відновлення мангрових заростей і водно-болотних угідь може захистити аквакультурні ферми від впливу температурних коливань і забезпечити природну фільтрацію патогенів. Крім того, сприяння міжнародному співробітництву у сфері кліматично-стійких методів аквакультури матиме важливе значення для підтримки цієї життєво важливої галузі в умовах мінливого навколишнього середовища (Zucca et al., 2021).

2.1. Економічні наслідки впливу глобального потепління на аквакультуру

Зниження врожайності морепродуктів та риби

Глобальне потепління порушує баланс водних екосистем, безпосередньо впливаючи на популяції риби та молюсків. Підвищення температури моря, підкислення та зміна океанічних течій змінюють середовище існування та фізіологію водних видів. Наприклад, потепління океану зменшує доступність кисню у воді, що спричиняє стрес для морських мешканців і призводить до зниження темпів росту та репродуктивного успіху (Baag & Mandal, 2022). Ці стресові фактори призводять до значного скорочення рибних запасів і вилову молюсків, що має каскадний вплив на прибутковість аквакультури (Doney et al., 2009).

Сукупний вплив потепління та підкислення значно погіршує процеси кальцифікації у молюсків, таких як устриці та молюски. Знижений рівень рН перешкоджає їхньому росту та виживанню, що ставить під загрозу їхню доступність для аквакультури. Дослідження показали, що організми, які кальцифікують, особливо вразливі до зниження концентрації карбонатних іонів, спричиненого збільшенням атмосферного CO₂ (Nienhuis et al., 2010). Як наслідок, оператори аквакультури стикаються з подвійним викликом: пом'якшенням впливу на навколишнє середовище та підтриманням рівня виробництва.

Погіршення якості води та спалахи захворювань



Якість води є критично важливим фактором в аквакультурі, а зміна клімату посилює її погіршення. Підвищення температури води сприяє поширенню шкідливого цвітіння водоростей (ВЦВ), яке знижує рівень кисню і вивільняє токсини, шкідливі для водних видів. Таке цвітіння, спричинене багатими на поживні речовини стоками і потеплінням води, призводить до масової загибелі риби та економічних втрат в аквакультурі (USEPA, 2014).

Крім того, вища температура води прискорює поширення хвороб серед водних видів. Патогени процвітають у теплих умовах, що призводить до збільшення спалахів захворювань в аквакультурних системах. Наприклад, дослідження аквакультури устриць показують, що потепління температури послаблює імунітет устриць і підвищує сприйнятливість до інфекцій, знижуючи виживаність і продуктивність (Neokye et al., 2024). Ці фактори в сукупності знижують економічну життєздатність аквакультури, збільшуючи рівень смертності та витрати на лікування.

Витрати на адаптацію

Адаптація до викликів, спричинених кліматичними змінами, вимагає значних інвестицій в інфраструктуру та управлінські практики. Аквакультурні об'єкти повинні впроваджувати стійкі технології, такі як системи контролю температури та стійкі до хвороб види, щоб підтримувати рівень виробництва. Однак ці адаптації потребують значних витрат, що може призвести до виснаження фінансових ресурсів операторів аквакультури, особливо в регіонах з низьким рівнем доходу (Naylor et al., 2023).

Потреба в адаптаційних заходах ще більше підкреслюється зміною географічного розподілу придатних для аквакультури ділянок. Підвищення рівня моря та екстремальні погодні явища змушують переміщувати аквакультурні підприємства в райони з більш стабільними умовами, що збільшує економічний тягар витрат на переміщення. Крім того, політика, спрямована на пом'якшення впливу на навколишнє середовище, наприклад, суворіші правила поводження з відходами та використання ресурсів, вимагає інвестицій у заходи з дотримання вимог та передові технології (Garlock et al., 2022).

Регіональний та глобальний вплив

Економічні наслідки глобального потепління для аквакультури розподілені нерівномірно. Регіони з дуже вразливими екосистемами, такі як тропіки, стикаються з більш вираженими проблемами. Висока солоність, посуха та інвазивні види порушують діяльність аквакультури, особливо для таких видів, як креветки та тилапія. І навпаки, регіони з помірним кліматом зазнають відносно помірної впливу, але не застраховані від довгострокових наслідків зміни клімату, таких як зміна структури опадів і збільшення частоти штормів (Mahu et al., 2022).

У всьому світі попит на продукцію аквакультури продовжує зростати, що зумовлено зростанням чисельності населення та потребою у сталих джерелах білка. Це створює парадоксальну ситуацію, коли сектор аквакультури повинен нарощувати виробництво, щоб задовольнити попит, одночасно борючись з економічними та екологічними витратами на адаптацію до зміни клімату. Якщо не вирішити ці проблеми, існує ризик загострення продовольчої безпеки та економічної нерівності (FAO, 2022).

Політика та управління



Ефективні політичні рамки мають вирішальне значення для пом'якшення економічних наслідків глобального потепління для аквакультури. Уряди та міжнародні організації повинні впроваджувати стратегії, спрямовані на підтримку сталих практик та сприяти дослідженню стійких систем аквакультури. Наприклад, інвестиції в генетичні дослідження з метою виведення кліматично стійких видів та створення систем раннього попередження щодо ВЦВ можуть зменшити вразливість та підвищити стійкість сектору (Handisyde et al., 2017).

Крім того, інтеграція політики в галузі аквакультури в ширші плани дій щодо зміни клімату забезпечує скоординований підхід до вирішення цих проблем. Політика повинна забезпечувати баланс між економічним зростанням та екологічною стійкістю, дозволяючи операторам аквакультури адаптуватися без шкоди для екологічної цілісності (Naylor et al., 2023).

2.2. Вплив глобального потепління на географічні зміни в аквакультурі

Зміна зон: Переміщення придатних для аквакультури територій

Екологічні зміни, спричинені зміною клімату, призводять до переміщення зон аквакультури. Підвищення температури океану призводить до переміщення видів і операцій, оскільки багато традиційних районів аквакультури стають менш життєздатними через термічний стрес і зниження якості води (Zarzycny et al., 2024). Прикладом цього явища є тропізація морського середовища, коли тропічні види поширюються в помірні регіони, змінюючи структуру екосистем і створюючи нові спільноти (Zarzycny et al., 2024).

На додаток до змін температури, на внутрішню аквакультуру впливають зміни в режимі опадів та доступності прісної води. Наприклад, зменшення водного потоку та підвищення солоності в естуарійних регіонах впливає на зростання видів, що залежать від певного рівня солоності (Priya et al., 2023). Як наслідок, аквакультурні підприємства стикаються з підвищеними витратами, пов'язаними з переміщенням у регіони з більш стабільними та придатними екологічними умовами (Mdoe et al., 2025). Таке переміщення часто вимагає проведення детальних екологічних оцінок для визначення територій, які можуть стабільно підтримувати аквакультуру, мінімізуючи при цьому екологічну деградацію.

Більше того, процес переселення - це не лише технічний, але й соціально-економічний виклик. Багато громад, які залежать від аквакультури як джерела засобів до існування, можуть зіткнутися з вимушеним переселенням або втратою робочих місць у разі перенесення виробництва. Зусилля, спрямовані на пом'якшення такого впливу, вимагають залучення зацікавлених сторін, програм перекваліфікації та підтримки альтернативних варіантів отримання засобів до існування.

Змінені кліматичні умови сприяють поширенню інвазивних видів, які конкурують з місцевими видами і порушують роботу аквакультури. Наприклад, тропізація помірних зон сприяє поширенню інвазивних видів, таких як риба-лев і певні види водоростей, які можуть витіснити місцеві організми і погіршити здоров'я екосистеми (Woods et al., 2016). Ці інвазії часто вимагають від операторів аквакультури впровадження дорогих стратегій управління для підтримки рівня виробництва.



Крім того, поява інвазивних патогенів, якій сприяють підвищення температури та глобальна торгівля, збільшує поширеність спалахів хвороб. Це особливо стосується таких цінних видів, як креветки та лосось, які є вразливими до інфекцій у теплих водах (Ross et al., 2023). Вирішення цих проблем вимагає значних інвестицій у заходи біобезпеки, включаючи вдосконалення систем моніторингу та виведення стійких до патогенів порід. Для підвищення стійкості до хвороб у видів аквакультури досліджуються передові біотехнологічні інструменти, такі як редагування генів на основі CRISPR.

Інвазивні види також порушують природний баланс екосистем, що призводить до втрати біорізноманіття. Наприклад, інвазивні водорості можуть утворювати щільні килимки, які пригнічують коралові рифи та зарості морської трави, що є важливим середовищем існування для багатьох морських організмів.

Інвазивні види: Екологічні та операційні порушення Adaptation Strategies

Адаптація до цих викликів передбачає поєднання технологічних інновацій, політичного втручання та екосистемних підходів. Ключові стратегії включають;

1. Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА): завдяки включенню видів з різних трофічних рівнів, системи ІМТА пом'якшують вплив інвазивних видів та підвищують екологічну стійкість (Mdoe et al., 2025). Цей підхід також максимізує ефективність використання ресурсів шляхом рециркуляції поживних речовин у системі.
2. Генетичні поліпшення: Виведення порід, більш стійких до температурних коливань і хвороб, є вирішальним кроком у забезпеченні сталості аквакультури (Ross et al., 2023). Програми селективного розведення та геномні інструменти використовуються для створення штамів риби та молюсків, які можуть процвітати в мінливих умовах навколишнього середовища.
3. Удосконалені системи моніторингу та раннього попередження: Збір даних у реальному часі та прогнозне моделювання можуть допомогти операторам передбачати та реагувати на зміни умов навколишнього середовища та спалахи інвазійних видів (Wang et al., 2021). Наприклад, супутникові знімки та аналітика на основі штучного інтелекту все частіше використовуються для моніторингу температури океану, цвітіння водоростей та інших важливих параметрів.
4. Політика та регулювання: Впровадження та дотримання ефективної політики, яка сприяє сталому розвитку та захисту біорізноманіття, має вирішальне значення. Наприклад, політика, спрямована на управління інвазійними видами та запобігання їхньому поширенню, може зменшити екологічні та економічні збитки (Priya et al., 2023). Спільні міжнародні рамки, такі як Цілі сталого розвитку Організації Об'єднаних Націй, можуть слугувати орієнтиром і підтримкою для таких зусиль.
5. Залучення громадськості: Успішна адаптація вимагає залучення місцевих громад до процесів прийняття рішень. Розширення прав і можливостей громад за допомогою освіти та ініціатив з розбудови потенціалу гарантує, що стратегії адаптації будуть ефективними та справедливими.

Регіональні відмінності у впливі



Вплив глобального потепління на зони аквакультури суттєво відрізняється залежно від регіону. Тропічні регіони, які вже відчувають високі температури, стикаються з найбільшими проблемами, оскільки вони стають менш придатними для традиційних видів аквакультури. І навпаки, в помірних регіонах спостерігається приплив тропічних видів, що створює можливості для диверсифікації, але також і ризики, пов'язані з дисбалансом екосистем (Zarzyczny et al., 2024).

Прибережні регіони особливо вразливі до підвищення рівня моря та штормових нагонів, які завдають шкоди інфраструктурі аквакультури та порушують виробничі цикли. У відповідь на це деякі підприємства переміщуються у внутрішні або морські райони з більш стабільними умовами, хоча такий перехід пов'язаний зі значними витратами і логістичними складнощами (Woods et al., 2016). Морська аквакультура, хоча і є багатообіцяючою, потребує вдосконалення інженерних технологій, щоб витримати суворі умови океану та зменшити вплив на навколишнє середовище

Регіони з потужним державним управлінням та дослідницьким потенціалом, такі як Північна Європа та Північна Америка, мають кращі можливості для адаптації до цих викликів. Натомість регіони з низьким рівнем доходу, особливо на Глобальному Півдні, стикаються зі значними бар'єрами, включаючи обмежений доступ до фінансування, технологій та експертизи. Подолання цих диспропорцій має вирішальне значення для забезпечення глобальної продовольчої безпеки та справедливого розвитку.

Підсумок

Термічна стратифікація та виснаження кисню є значними загрозами для водних екосистем, що мають значні екологічні та економічні наслідки. Розуміння взаємодії фізичних, хімічних і біологічних процесів, що спричиняють ці зміни, має важливе значення для розробки ефективних стратегій пом'якшення наслідків. Інтегруючи технологічні досягнення та сталі практики, можна краще управляти впливом глобального потепління на водні системи.

Підвищення глобальної температури створює величезні виклики для водних видів, збільшуючи метаболічні потреби, спричиняючи проблеми росту та репродукції. Ці фізіологічні зміни не лише загрожують окремим видам, але й ставлять під загрозу цілісність екосистем. Всебічне розуміння цієї динаміки в поєднанні з цілеспрямованими зусиллями щодо пом'якшення наслідків має вирішальне значення для збереження водного біорізноманіття та підтримки якості води в умовах мінливого клімату.

Спричинені кліматом коливання солоності суттєво впливають на прибережні та морські екосистеми, порушуючи розподіл видів і роботу аквакультури, створюючи виклики для залежних громад. Подолання цих наслідків вимагає цілісного підходу, що поєднує екологічні та соціально-економічні міркування. Надаючи пріоритет адаптивним стратегіям, включаючи практики сталого управління та надійні політичні рамки, можна пом'якшити ці виклики і захистити біорізноманіття та засоби до існування.

Навантаження поживними речовинами та евтрофікація залишаються критичними загрозами для водних екосистем, спричиняючи шкідливе цвітіння водоростей, виснаження кисню та деградацію екосистем. Ефективні стратегії пом'якшення наслідків мають бути спрямовані на



зменшення надходження поживних речовин, відновлення екосистемного балансу та сприяння співпраці між зацікавленими сторонами, політиками та науковцями задля досягнення стійких результатів.

Дефіцит води, посилений глобальним потеплінням та діяльністю людини, створює значні виклики для глобальної водної безпеки. Посухи, непередбачувані опади та погіршення якості води загрожують як екосистемам, так і людському населенню. Пріоритетність практик сталого управління водними ресурсами, сприяння міжнародному співробітництву та впровадження інноваційних рішень є важливими для пом'якшення цих викликів та захисту життєво важливих водних ресурсів для майбутніх поколінь.

Глобальне потепління також глибоко впливає на аквакультуру, підвищуючи вразливість видів до температурних коливань та збільшуючи ризики захворювань і паразитів. Ці виклики мають далекосяжні наслідки для продовольчої безпеки та економічної стабільності прибережних громад. Спільні зусилля дослідників, політиків та зацікавлених сторін галузі необхідні для розробки та впровадження інноваційних рішень, які підвищують стійкість та сталість аквакультури.

Географічний перерозподіл зон аквакультури внаслідок зміни клімату вимагає проактивних стратегій адаптації. Підвищення температури моря, зміна течій та зміна режиму опадів вимагають перенесення виробництва та впровадження сталих практик. Інтеграція традиційних екологічних знань із сучасними науковими досягненнями може створити цілісні рішення для цих викликів, забезпечуючи стійкість аквакультури та її подальший внесок у глобальну продовольчу безпеку.

Список літератури

- SAndreyeva, A. Y., Kukhareva, T. A., Gostyukhina, O. L., & Vialova, O. Y. (2024). Impacts of ocean acidification and hypoxia on cellular immunity, oxygen consumption, and antioxidant status in Mediterranean mussel. *Fish and Shellfish Immunology*, 154, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109932>
- Baag, S., & Mandal, S. (2022). Combined effects of ocean warming and acidification on marine fish and shellfish: A molecule to ecosystem perspective. *Science of the Total Environment*, 802, 149807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149807>
- Bhuiyan, M. M. U., Rahman, M., Naher, S., Shahed, Z. H., Ali, M. M., & Islam, A. R. M. T. (2024). Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100621>
- Burke, M., Grant, J., Filgueira, R., & Swanson, A. (2022). Oxygenation effects on temperature and dissolved oxygen at a commercial Atlantic salmon farm. *Aquacultural Engineering*, 99, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102287>
- Day, J. W., Rybczyk, J. M., & Stephens, J. R. (2024). Climate change effects on nutrient loading and coastal eutrophication. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 6(18), 627–637. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00112-8>
- DeNicola, E., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Khwaja, H., & Carpenter, D. O. (2015). Climate change and water scarcity: The case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, 81(3), 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005>



- Deutsch, C., Penn, J. L., & Seibel, B. A. (2020). Climate change constrains fish metabolic scope and habitat suitability globally. *Science Advances*, 6(22), eaax0194. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0194>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Duarte, J. A., Villanueva, R., Seijo, J. C., & Vela, M. A. (2022). Ocean acidification effects on aquaculture of a high resilient calcifier species: A bioeconomic approach. *Aquaculture*, 559, 738426. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738426>
- Esbaugh, A. J. (2025). Physiological responses of euryhaline marine fish to naturally-occurring hypersalinity. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 299, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2024.111768>
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org>
- Garlock, T., Asche, F., Anderson, J., Bjørndal, T., Kumar, G., Lorenzen, K., Ropicki, A., Smith, M. D., & Tveterås, R. (2022). Aquaculture's role in sustainable food systems. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in the twenty-first century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies, and impediments. *Environmental Pollution*, 271, 116332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Grabba, K. C., Ghosh, A., Adekunbi, F. O., Williamson, P., & Widdicombe, S. (2024). Ocean acidification: Causes, impacts, and policy actions. In *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 51–59). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14082-2.00011-9>
- Guimbeau, A., Ji, X. J., Long, Z., & Menon, N. (2024). Ocean salinity, early-life health, and adaptation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 125, 102954. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.102954>
- Hamilton, S. L., Elliott, M. S., deVries, M. S., Adelaars, J., & Rintoul, M. D. (2022). Integrated multi-trophic aquaculture mitigates the effects of ocean acidification: Seaweeds raise system pH and improve growth of juvenile abalone. *Aquaculture*, 560, 738571. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738571>
- Handisyde, N., Ross, L. G., Badjeck, M.-C., & Allison, E. H. (2017). Climate change and aquaculture: Vulnerability and adaptation in the tropics. *Aquaculture*, 467, 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.012>
- Hoeksema, S. D., Chuwen, B. M., Tweedley, J. R., & Potter, I. C. (2023). Ichthyofaunas of nearshore, shallow waters of normally-closed estuaries are highly depauperate and influenced markedly by salinity and oxygen concentration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108410. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108410>
- Liu, S., Liu, Y., & Xing, Q. (2024). Climate change drives fish communities: Changing multiple facets of fish biodiversity in the Northwest Pacific Ocean. *Science of the Total Environment*, 955, 176854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176854>
- Mahu, E., et al. (2022). Climate-induced hazards and their impacts on aquaculture. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>



- Mangi, S. C., Lee, J., Pinnegar, J. K., & Law, R. J. (2018). The economic impacts of ocean acidification on shellfish fisheries and aquaculture in the United Kingdom. *Environmental Science and Policy*, 86, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.008>
- Mdoe, C. N., Mahonge, C. P., & Ngowi, E. E. (2025). Mapping the trends, knowledge production, and practices of climate-smart aquaculture. *Aquaculture*, 598, 741939. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741939>
- Mensah, V., Chen, Y.-C., & Ohshima, K. I. (2025). Multidecadal decline in sea ice meltwater volume and implications for nutrient dynamics. *Progress in Oceanography*, 230, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103377>
- Mingote, M. G., Galimany, E., Sala-Coromina, J., Bahamon, N., Ribera-Altimir, J., Santos-Bethencourt, R., & Clavel-Henry, M. (2024). Warming and salinization effects on the deep-water rose shrimp, *Parapenaeus longirostris*, distribution along the NW Mediterranean Sea: Implications for bottom trawl fisheries. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115838. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115838>
- Moussa, L. G., Mohan, M., Arachchige, P. S. P., Rathnasekara, H., Abdullah, M., & Abulibdeh, A. (2025). Impact of water availability on food security in GCC: Systematic literature review-based policy recommendations for a sustainable future. *Environmental Development*, 54, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101122>
- Naylor, R., et al. (2023). A global view of aquaculture policy. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Neokye, E. O., et al. (2024). Climate change impacts on oyster aquaculture: Part II. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Nienhuis, S., et al. (2010). Ocean acidification effects on calcifying organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 400, 287-302. <https://doi.org/10.3354/meps08307>
- Okon, E. M., Oyesiji, A. A., & Eissa, E. H. (2024). The escalating threat of climate change-driven diseases in fish: Evidence from a global perspective. *Environmental Research*, 263, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120184>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., & Sivarethinamohan, R. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystems. *Environmental Research*, 238, 117233. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117233>
- Rahman, M. M., & Hung, T.-C. (2024). Impact of salinity and body size on sperm motility in three California smelt species. *Aquaculture Reports*, 39, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102503>
- Reister, I., Danielson, S., & Aguilar-Islas, A. (2024). Perspectives on Northern Gulf of Alaska salinity field structure, freshwater pathways, and controlling mechanisms. *Progress in Oceanography*, 229, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103373>
- Ross, F. W. R., Boyd, P. W., & Filbee-Dexter, K. (2023). Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, 885, 163699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163699>
- Seibel, B. A. (2024). On the validity of using the Metabolic Index to predict the responses of marine fishes to climate change. *Encyclopedia of Fish Physiology*, 3, 549-558. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90801-6.00167-1>



- Sundararaman, H. K., & Shanmugam, P. (2024). Estimates of the global ocean surface dissolved oxygen and macronutrients from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 311, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114243>
- USEPA. (2014). Harmful algal blooms: Impacts on aquatic ecosystems. U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www.epa.gov>
- Wang, Y.-S., & Gu, J.-D. (2021). Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystems to global climate change. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 162, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105248>
- Woods, J. S., Veltman, K., & Huijbregts, M. A. J. (2016). Towards a meaningful assessment of marine ecological impacts in life cycle assessment. *Environment International*, 89–90, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.033>
- Zarzynczy, K. M., Rius, M., & Williams, S. T. (2024). The ecological and evolutionary consequences of tropicalisation. *Trends in Ecology & Evolution*, 39(3), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.10.006>
- Zhang, T., Liu, H., Lu, Y., Wang, Q., & Loh, Y. C. (2024). Impact of climate change on coastal ecosystem and outdoor activities: A comparative analysis among four largest coastline covering countries. *Environmental Research*, 250, 118405. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118405>
- Zucca, C., Middleton, N., Kang, U., & Liniger, H. (2021). Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management. *Catena*, 207, 105669. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669>

Таблиця 1. Назва таблиці

| Колонка 1 | Колонка 2 | Колонка 3 | Колонка 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Текст | Текст | Текст | Текст |
| Текст | Текст | Текст | Текст |
| Текст | Текст | Текст | Текст |
| Текст | Текст | Текст | Текст |
| Текст | Текст | Текст | Текст |