



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

АКВАКУЛЬТУРА ДЛЯ КЛІМАТИЧНО СТІЙКОГО МАЙБУТНЬОГО

2025

Akademija



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

Аквакультура для кліматично стійкого майбутнього

Автори: Власта БАРТУЛОВІЧ, Анжеліка ДАУТАРТЕ, Ергюн ДЕМІР, Тетяна ДОБРОСЛАВІЧ, Дімітріс КЛАУДАТОС, Галина КРУСІР, Марина МАРДАР, Ольга САХДІЄВА, Мухіттін ЗЕНГІН, Альвідас ЖІБАС, Гражина ЖІБІЕНЕ

Редактор: Анжеліка ДАУТАРТЕ

Рецензенти:

1. Доцент, доктор наук Мідона ДАПКІЕНЕ, Вютаутас Магнусський університет
2. Доцент, доктор наук Дайва ШІЛЕЙКІЕНЕ, Вютаутас Магнусський університет

Ця публікація була розроблена в рамках проекту Erasmus+ «Цифрова блакитна кар'єра для поствуглецевого майбутнього – інновації в навчальній програмі з аквакультури» [DiBluCa] (№ 2023-1-LT01-KA220-HED-000154247).

Підтримка Європейської комісії у створенні цієї публікації не означає схвалення її змісту, який відображає виключно погляди авторів, і Комісія не несе відповідальності за будь-яке використання інформації, що міститься в ній.

Всі права захищені. Жодна частина цієї публікації не може бути відтворена, збережена в системі пошуку або передана в будь-якій формі або будь-якими засобами – електронними, механічними, фотокопіюванням, записом або іншим способом – без попереднього дозволу видавця, за винятком коротких цитат, що використовуються для поширення.

ISBN:

Cover design:

Layout:



Передмова

Сучасний світ переживає швидкі зміни. Ознаки того, що зміна клімату є не віддаленою перспективою, а реальною проблемою сьогодення, включають підвищення температури, екстремальні погодні явища, підкислення океанів та коливання рівня моря. Це явище має далекосяжні наслідки для всіх аспектів суспільства, впливаючи на людей, екосистеми, сільськогосподарські системи та громади. Аквакультура, що є складовою частиною рибного господарства, є сектором, який особливо чутливий до цих змін. Вона є життєво важливим джерелом білка для зростаючого населення світу і вважається зразком для майбутнього сталого виробництва продуктів харчування.

Метою цієї публікації є сприяння розумінню читачами наслідків зміни клімату для аквакультури та підкреслення знань і рішень, необхідних для забезпечення стійкого, етичного та сталого розвитку цього сектора. Цей зв'язок позначає зближення наукової, технологічної та практичної сфер, підкреслюючи надзвичайну важливість адаптивності людини, співпраці та схильності до змін.

У даному виданні розглядаються не тільки наслідки екологічних змін, таких як тепловий стрес, спалахи захворювань, ефективність годівлі, генетична адаптація та використання біотехнологій, але й системи, методи та політичні заходи, які можуть допомогти сектору рухатися вперед. Темі охоплюють адаптацію систем рециркуляційної аквакультури (RAS), впровадження інтегрованої мультитрофічної аквакультури (ІМТА), управління стратегіями годівлі в умовах мінливих температурних режимів та використання інновацій для пом'якшення наслідків окислення океану.

Проте, дана публікація не стосується виключно систем та технологій. У центрі уваги цього дослідження – люди. Цей текст стосується студентів, які мають визначити синю економіку майбутнього. Наступний дискурс стосується педагогів, на яких покладено відповідальність за виховання цінностей у своїх учнів. Наступний дискурс стосується зусиль фермерів та дослідників у їхньому пошуку рішень як на місцевому, так і на глобальному рівнях. Це стосується всіх осіб, які турбуються про спадщину, яку залишать нащадкам.

Ця публікація була розроблена в рамках проекту під назвою «Цифрова синя кар'єра для пост-вуглецевого майбутнього – інновації в навчальній програмі з аквакультури». Ця ініціатива покликана заохотити більш глибоке вивчення теми, сприяти впровадженню стійких практик та виховати почуття відповідальності у всіх людей. У контексті зміни клімату практика аквакультури повинна розглядатися з точки зору як викликів, так і можливостей.

Доцент, доктор наук Анжеліка Даутарте

Кафедра екологічних наук та екології

Факультет лісових наук та екології, Академія сільськогосподарства ВМУ



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

Скорочення

DHA – докозагексаєнова кислота

EPA – ейкозапентаєнова кислота

FCR – коефіцієнт конверсії корму

FER – коефіцієнт ефективності корму

GE – валова енергія

GHG – парникові гази

HAB – шкідливе цвітіння водоростей

IMTA – інтегрована мультитрофічна аквакультура

LCA – оцінка життєвого циклу

MO – багатоцільова оптимізація

NE – чиста енергія

pH – шкала, що використовується для вимірювання кислотності або лужності води

ppt – частин на тисячу

PUFA – поліненасичені жирні кислоти

RAS – рециркуляційна аквакультурна система

SCO – одноклітинні організми.



ЗМІСТ

Передмова	3
Скорочення.....	4
Розділ 1. Вплив глобального потепління на якість води та вплив на аквакультуру.....	7
Вступ	7
1. Вплив глобального потепління на якість води.....	8
2. Вплив глобального потепління на аквакультуру	16
Підсумок	21
Список використаних джерел.....	22
Розділ 2. Екологічні впливи аквакультури з точки зору глобального потепління.....	25
Вступ	25
1. Парникові гази та вуглецевий слід.....	26
2. Споживання енергії та сталість	29
3. Зміна землекористування та перетворення середовищ існування	31
4. Виробництво кормів та використання ресурсів	33
5. Забруднення та залишкові речовини.....	36
Підсумок	40
Список використаних джерел	41
Розділ 3. Глобальне потепління та селекція, біотехнології в аквакультурі	44
Вступ	44
1. Зміна клімату та розмноження видів	45
2. Передові методи селекції	47
3. Генна інженерія та CRISPR.....	50
4. Кріоконсервування та допоміжні репродуктивні технології.....	58
5. Етичні, екологічні та регуляторні аспекти	63
Підсумок	67
Список використаних джерел	69
Розділ 4. Зміни в кормах та методах годування в аквакультурі через глобальне потепління	71
Вступ	71
1. Зміни у фізіології харчування	72
2. Екологічно стійкі кормові інгредієнти в аквакультурі.....	74



3.	Практики управління кормовими ресурсами	83
4.	Пом'якшення наслідків окислення океану.....	85
5.	Підвищення ефективності корму та його засвоюваності.....	88
	Висновок	93
	Список використаних джерел	94
1.	Поширені захворювання та їх наслідки	104
2.	Захисні заходи та застосування біотехнологій для пом'якшення впливу хвороб ...	114
3.	Поточні та нові рішення для подолання впливу глобального потепління на здоров'я аквакультури.....	124
	Підсумок	127
	Список використаних джерел	127
Розділ 6. Вибір систем для аквакультури в умовах глобального потепління		129
1.	Кліматичні виклики для систем аквакультури.....	130
2.	Ключові критерії вибору системи	132
3.	Інноваційні системи для вирішення кліматичних проблем.....	134
4.	Політичні та економічні міркування.....	136
	Підсумок	138
	Список використаних джерел	139
Глосарій.....		142



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

**Доцент, доктор наук Анжеліка Даутарте
Університет Витатуса Магнуса**

Вступ

Підвищення глобальної температури внаслідок зміни клімату має значний вплив на водні екосистеми, зокрема на процеси метаболізму та росту водних видів. Підвищення температури прискорює метаболізм, збільшуючи потребу водних організмів в кисні, що може призвести до проблем із ростом та розмноженням. У цьому розділі розглядається взаємодія між змінами температури та фізіологічними процесами водних видів, а також надаються відомості про те, як ця динаміка впливає на якість води та здоров'я екосистем. Зміна клімату також глибоко впливає на прибережні та естуарні екосистеми, а коливання солоності стають критичним наслідком. Танення полярних льодів та зміна режиму опадів значно сприяють змінам рівня солоності, особливо в регіонах поблизу притоків прісної води. Ці коливання становлять проблему для водних організмів, які залежать від стабільних умов солоності, змінюючи динаміку екосистем та загрожуючи біорізноманіттю (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Зміни солоності внаслідок зміни клімату ще більше порушують морські екосистеми. Коливання солоності, спричинені таненням полярних льодів, зміною режиму опадів та збільшенням швидкості випаровування, впливають на розподіл морських видів, що позначається на біорізноманітті та ускладнює діяльність аквакультури. Навантаження поживними речовинами від сільськогосподарських стоків, промислових скидів та міського забруднення посилює евтрофікацію, що призводить до шкідливого цвітіння водоростей (НАВ), виснаження кисню та серйозних порушень морських і прісноводних екосистем. Евтрофікація, яка стає все більш поширеною через антропогенний вплив та зміну клімату, має широкі екологічні та економічні наслідки (Zhang et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Подвійний тиск кліматичних змін і людської діяльності все більше загрожує доступності та якості води. Посухи та дефіцит води, що посилюються підвищенням температури та непередбачуваними опадами, порушують глобальні гідрологічні цикли. Одночасно погіршення якості води через забруднення та неправильне управління створює значні проблеми для екосистем і населення (DeNicola et al., 2015; Moussa et al., 2025). Глобальне потепління також створює проблеми для аквакультури, змінюючи екологічні умови, необхідні для водних видів. З підвищенням температури води багато видів не можуть розвиватися поза межами оптимального температурного діапазону, що призводить до зниження врожайності та



збільшення смертності. Крім того, тепліші води створюють ідеальні умови для патогенів і паразитів, що посилює ризики для аквакультури (DeNicola et al., 2015; Moussa et al., 2025). Ці взаємопов'язані проблеми мають значний вплив на стійкість і прибутковість аквакультури.

Географічний розподіл зон аквакультури змінюється під впливом глобального потепління. Підвищення температури моря, зміна океанічних течій та зміна режиму опадів впливають на придатність традиційних регіонів для аквакультури. Ця зміна вимагає стратегічних адаптацій, таких як перенесення діяльності в нові придатні зони, а також вирішення проблем, пов'язаних з інвазивними видами, які процвітають в змінених умовах і порушують природні екосистеми. Ці порушення мають значні соціально-економічні та екологічні наслідки, що вимагає негайної уваги з боку політиків, дослідників та зацікавлених сторін галузі.

1. Вплив глобального потепління на якість води

1.1. Зміни температури та їх вплив на екосистеми

1.1.1. Механізми термічної стратифікації та виснаження кисню

Термічна стратифікація відбувається, коли різниця в температурі води створює чіткі шари в водоймі. Цей процес посилюється глобальним потеплінням, оскільки підвищення температури поверхні посилює розділення між теплішою, легшою поверхневою водою та холоднішою, більш щільною глибинною водою. Ці шари перешкоджають вертикальному перемішуванню, обмежуючи рух кисню вниз і рух поживних речовин вгору. Як наслідок, рівень кисню в глибоких водах знижується, що призводить до гіпоксії або аноксії, які мають серйозний вплив на морські екосистеми (Bhuiyan et al., 2024; Burke et al., 2022).

Виснаження кисню особливо помітне в районах зі слабкою вентиляцією та високими темпами розкладання органічної речовини. Наприклад, у східній частині тропічного Тихого океану (ЕТР) та Аравійському морі спостерігаються великі зони мінімального вмісту кисню (OMZ), де рівень розчиненого кисню нижчий за 20 мкмоль/л, на глибині від 100 до 1000 метрів. Ці регіони підкреслюють взаємозв'язок між повільною циркуляцією океану, розкладом органічної речовини та обмеженим поповненням кисню (Bhuiyan et al., 2024).

Регіональні та глобальні тенденції

З 1960 року вміст кисню в океанах у всьому світі зменшився приблизно на 2%. Ця тенденція пов'язана з посиленням стратифікації, евтрофікацією та потеплінням. У прибережних регіонах, зокрема в Мексиканській затоці та Чесапікській затоці, відбулося значне розширення гіпоксичних зон, які зазвичай називають «мертвими зонами». Ці зони утворюються переважно внаслідок стоку поживних речовин, що сприяє цвітінню водоростей, що призводить до посиленого 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, на які впливає апвелінг, такі як Каліфорнійська течія, демонструють більшу мінливість кисню через взаємодію багатих поживними речовинами холодних вод та біологічної продуктивності (Sundararaman & Shanmugam, 2024).



Вплив на морське життя

Виснаження кисню безпосередньо впливає на водні види, зменшуючи зони, придатні для проживання, та змінюючи динаміку екосистем. Найбільше страждають нерухомі організми та бентосна фауна, оскільки вони не можуть втекти від умов з низьким вмістом кисню. Риби та рухливі безхребетні стикаються зі скороченням ареалу проживання, що змушує їх переходити в більш мілкі, багаті киснем шари, що збільшує конкуренцію та ризик хижацтва. Крім того, тривала гіпоксія може порушити розмноження та ріст, що призведе до скорочення популяцій комерційно важливих видів (Burke et al., 2022; Sundararaman & Shanmugam, 2024).

Стратегії пом'якшення наслідків

1. **Посилений моніторинг.** Досягнення в галузі дистанційного зондування та біогеохімічних моделей забезпечують дані в режимі реального часу про динаміку кисню та поживних речовин, що сприяє ранньому виявленню гіпоксичних умов.
2. **Управління поживними речовинами.** Зменшення сільськогосподарських стоків та впровадження стійких методів ведення сільського господарства можуть пом'якшити евтрофікацію та пов'язане з нею виснаження кисню.
3. **Системи оксигенації.** В аквакультурі для зменшення стресу, спричиненого низьким рівнем кисню в рибних господарствах, застосовуються такі технології, як впорскування рідкого кисню та системи аерації, які мають різний успіх залежно від умов навколишнього середовища (Burke et al., 2022).
4. **Пом'якшення наслідків зміни клімату.** Усунення основних причин глобального потепління шляхом зменшення викидів вуглецю має вирішальне значення для зміни тенденцій стратифікації та збереження морського біорізноманіття (Bhuiyan et al., 2024).

1.1.2. Швидкість метаболізму та потреба в кисні

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

Риби є особливо вразливими, оскільки підвищений метаболізм вимагає більшого споживання кисню, що важко досягти в теплих водах із зниженою розчинністю кисню. Цей фізіологічний стрес не тільки гальмує ріст, але й впливає на виживаність, особливо для видів, що мешкають у мілководних або термічно стратифікованих середовищах (Okon et al., 2024).

Зростання та репродуктивні виклики

Підвищення температури значно змінює траєкторії росту та репродуктивні цикли водних видів. Для багатьох видів риб тепліші води призводять до більш раннього дозрівання, але коротшого терміну життя, порушуючи динаміку популяції та рівновагу екосистеми (Liu et al., 2024). Більше того, підвищена температура може погіршити якість гамет і зменшити



успішність нересту, тим самим знижуючи репродуктивну продуктивність. Наприклад, види в північно-західній частині Тихого океану продемонстрували зміни в своїх репродуктивних стратегіях як пряму реакцію на зміну теплового режиму, підкреслюючи глибокий вплив температури на особливості життєвого циклу (Liu et al., 2024).

Вплив на здоров'я екосистеми

Каскадний ефект змін у метаболізмі та рості поширюється на здоров'я екосистеми в цілому. Підвищення швидкості метаболізму призводить до більшого споживання поживних речовин і виділення відходів, що може посилити евтрофікацію у водах, які вже багаті поживними речовинами. Крім того, тепловий стрес може послабити імунну відповідь, роблячи види більш вразливими до патогенів і хвороб, як це спостерігається в глобальних системах аквакультури (Okon et al., 2024). Ці взаємодії підкреслюють гостру необхідність комплексних стратегій управління для пом'якшення впливу кліматичних факторів стресу на водні екосистеми.

Адаптивні заходи та стратегії пом'якшення наслідків

Водні види виявляють різний ступінь фенотипічної пластичності, щоб впоратися з тепловим стресом. Наприклад, евригалінні види пристосовують свої осморегуляторні механізми, щоб впоратися з підвищеною солоністю та коливаннями температури (Esbaugh, 2025). Однак ступінь таких адаптацій обмежений енергетичними обмеженнями, що підкреслює важливість проактивних заходів для пом'якшення впливу температури.

Ефективні стратегії включають відновлення прибережної рослинності для затінення водойм, зменшення теплового навантаження та посилення водотоку в стратифікованих системах для поліпшення розподілу кисню. Крім того, глобальні зусилля з обмеження викидів парникових газів залишаються вирішальними для усунення основних причин підвищення температури, спричиненого кліматичними змінами (Seibel, 2024).

1.2. Хімічний склад: кислотність, солоність і поживні речовини

1.2.1. Рівень pH і підкислення океану

Поглинання вуглекислого газу (CO₂) океанами є основною причиною окислення океанів, що призводить до помітного зниження рівня pH. З доіндустріальної епохи pH поверхні океану знизився приблизно на 0,1 одиниці, що відповідає 26% збільшенню концентрації іонів водню (Duarte et al., 2022). Це підкислення є результатом поєднання CO₂ з морською водою з утворенням вугільної кислоти, яка дисоціює на бікарбонатні та водневі іони, знижуючи pH і зменшуючи доступність карбонатних іонів (Grabba et al., 2024). Карбонатні іони необхідні для кальцифікуючих організмів, таких як молюски та корали, для побудови та підтримки їхніх карбонатно-кальцієвих структур. Зниження доступності карбонатів пов'язують із тоншими, слабшими мушлями та зменшенням цілісності скелета у морських видів (Andreyeva et al., 2024).

Закислення океану має серйозний вплив на кальцифікуючі організми, які особливо чутливі до змін стану насичення карбонатами. Лабораторні дослідження двостулкових молюсків, таких як мідії та устриці, показують, що зниження рівня pH перешкоджає формуванню раковини, уповільнює розвиток і збільшує смертність на ранніх стадіях життя (Hamilton et al., 2022).



Наприклад, мідія *Mytilus galloprovincialis* продемонструвала стійкість до низького рН, але все одно зазнає підвищених пошкоджень раковини та зниження темпів росту в умовах підкислення (Andreyeva et al., 2024). Такі фізіологічні стреси ставлять під загрозу виживання та життєздатність цих видів як у природних середовищах існування, так і в системах аквакультури.

Підкислення океану також шкодить некальцифікуючим видам, змінюючи їхні сенсорні функції, ріст та розмноження. У риб та безхребетних у умовах низького рН спостерігаються зміни в поведінці, такі як зменшення уникнення хижаків та зміна уподобань щодо середовища існування (Grabba et al., 2024). Крім того, підкислення в поєднанні з іншими стресовими факторами, такими як гіпоксія, посилює ці несприятливі ефекти, що призводить до ускладнення впливу на морське біорізноманіття (Andreyeva et al., 2024).

Економічні та екологічні наслідки

Економічні наслідки окислення океану є глибокими, особливо для галузей, що залежать від кальцифікуючих організмів. Рибальство молюсків та аквакультура стикаються із значними викликами, з прогнозованими втратами у виробництві та ринковій вартості через погіршення якості раковин та виживання (Mangi et al., 2018). У Сполученому Королівстві економічні втрати, пов'язані з окисленням океану, можуть становити від 14% до 28% від чистої поточної вартості рибного господарства за сценаріїв високих викидів (Mangi et al., 2018). Ці економічні тиски підкреслюють нагальність вирішення проблеми окислення для захисту морських ресурсів і засобів до існування.

З екологічної точки зору, порушення морських харчових ланцюгів є критичною проблемою. Зменшення популяцій кальцифікуючих організмів може мати каскадний ефект на динаміку хижак-жертва, цикл поживних речовин та загальну стабільність екосистеми (Duarte et al., 2022). Інтегровані підходи, такі як мультитрофічні системи аквакультури, показали свою ефективність у пом'якшенні цих наслідків завдяки використанню морських водоростей для буферизації рівнів рН та підтримки кальцифікуючих видів (Hamilton et al., 2022).

Стратегії пом'якшення наслідків та перспективи на майбутнє

Для вирішення проблеми окислення океану необхідні скоординовані глобальні зусилля з метою скорочення викидів CO₂ та впровадження адаптивних стратегій. Відновлення морських луків і мангрових заростей може підвищити стійкість прибережних територій завдяки поглинанню CO₂ і створенню середовища існування для морських організмів (Hamilton et al., 2022). Крім того, вдосконалення методів аквакультури з метою впровадження технологій буферизації рН, таких як використання морських водоростей, може пом'якшити вплив підкислення на вирощування молюсків (Hamilton et al., 2022).

Довгостроковий моніторинг та дослідження є необхідними для розуміння складних наслідків підкислення та розробки ефективної політики. Посилення міжнародного співробітництва та інтеграція наукових висновків у політичні рамки, такі як Глобальна рамкова угода про біорізноманіття Кун'мін-Монреаль, є необхідними для пом'якшення наслідків підкислення та захисту морського біорізноманіття (Grabba et al., 2024).



1.2.2. Зміни солоності

Основними чинниками коливань солоності є приплив прісної води від танення льодовиків, збільшення кількості опадів та сезонні коливання річкового стоку. Наприклад, у північній частині Аляскинського затоки приплив прісної води з льодовикових водозборів сприяє значним сезонним і просторовим коливанням солоності. Ці зміни додатково модулюються вітровим перемішуванням і прибережними течіями, які впливають на розподіл прісних водних потоків (Reister et al., 2024). Аналогічно, Берингове море зазнало значного поглиблення солоності через зменшення утворення морського льоду та збільшення обсягів талої води, що призвело до ослаблення стратифікації та змін у циклі поживних речовин (Mensah et al., 2025).

Вплив на морські та естуарні організми

Організми, що мешкають в естуаріях і прибережних регіонах, чутливі до коливань солоності. Для видів, які залежать від стабільної солоності, таких як молюски та певні популяції риб, зміни солоності можуть порушувати фізіологічні процеси, включаючи осморегуляцію, ріст і розмноження (Guimbeau et al., 2024). Наприклад, дослідження в Бангладеш показують, що підвищена експозиція до солоності під час критичних періодів розвитку призводить до затримки росту у дітей, що підкреслює більш широкі соціально-екологічні наслідки змін солоності (Guimbeau et al., 2024).

Естуарні системи, такі як у затоці Чесапек, стикаються з подвійним стресом від збагачення поживними речовинами та змін солоності. Підвищений рівень солоності пов'язують зі зменшенням видового різноманіття та змінами у складі спільнот, оскільки менш толерантні види замінюються опортуністичними генералістами (Zhang et al., 2024). Це зменшення біорізноманіття має каскадний ефект на стабільність харчового ланцюга та екосистемні послуги.

Більш широкі екологічні та соціально-економічні наслідки

Коливання солоності впливають не тільки на біорізноманіття, але й на продуктивність прибережного рибальства та аквакультури. Наприклад, проникнення солоної води в прісноводні системи зменшує кількість середовищ існування, придатних для прісноводних і солонуватих видів. В аквакультурі коливання солоності ускладнюють підтримання оптимальних умов, що впливає на ріст і виживання вирощуваних видів (Mensah et al., 2025).

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

Стратегії пом'якшення наслідків та адаптації

Для подолання наслідків коливань солоності необхідні комплексні стратегії управління. Відновлення прибережної рослинності, такої як мангрові зарості та морські водорості, може пом'якшити зміни солоності шляхом стабілізації осадів та поліпшення водоутримання. Крім того, вдосконалене моделювання припливу прісної води та динаміки солоності може



служувати основою для адаптивних методів управління, таких як зміна графіків зрошення та вибір солестійких сортів сільськогосподарських культур (Zhang et al., 2024).

У ширшому масштабі зменшення викидів парникових газів має вирішальне значення для пом'якшення основних чинників зміни клімату. Інвестиції в глобальні системи моніторингу та плани адаптації на рівні громад можуть ще більше підвищити стійкість до змін солоності в уразливих регіонах (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Механізми змін розподілу, спричинених солоністю

Коливання солоності в першу чергу обумовлені припливом прісної води, таненням льодовиків і зміною режиму 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, змушуючи види мігрувати в менш солоні райони або стикатися зі скороченням популяції (Hoeksema et al., 2023).

Морські організми виявляють різну толерантність до змін солоності, що впливає на їх розподіл. Евригалінні види, які здатні пристосовуватися до широкого діапазону солоності, домінують у районах із коливаннями рівня солоності. Однак стеногалінні види, які потребують стабільного рівня солоності, часто відступають у рефугіуми або зазнають скорочення популяції, коли рівень солоності відхиляється від оптимального (Rahman & Hung, 2024).

Вплив на розподіл видів та аквакультуру

Зміни солоності значно впливають на просторовий розподіл морських видів. Наприклад, глибоководна креветка *Parapenaeus longirostris* у Середземному морі змінила ареал свого поширення у відповідь на потепління та засолення, а її популяції перемістилися на північ і на більшу глибину, щоб уникнути несприятливих умов (Mingote et al., 2024). Ці зміни порушують місцеві екосистеми та рибальство, змінюючи динаміку хижак-жертва та доступність ресурсів.

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

Більш широкі екологічні та соціально-економічні наслідки

Зміни в розподілі видів, спричинені солоністю, мають каскадний вплив на екосистемні послуги. Зміни у складі спільнот впливають на цикл поживних речовин, первинну продукцію та стабільність морських харчових ланцюгів (Hoeksema et al., 2023). Наприклад, із розвитком гіперсолоності в естуаріях чисельність видів, що мешкають в естуаріях, зменшується, що призводить до зниження біорізноманіття та зміни функціонування екосистем.



З економічної точки зору, рибальство, яке залежить від конкретних видів, стикається з невизначеністю, оскільки цільові популяції мігрують у менш доступні райони. Це було спостережено 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 становлять значні виклики для аквакультури, що вимагає інвестицій в адаптивну інфраструктуру та практики для пом'якшення їх впливу на виробництво.

Стратегії пом'якшення наслідків та майбутні напрямки

Для вирішення проблеми впливу змін солоності на розподіл морських видів необхідні комплексні стратегії управління, що враховують вплив як на види, так і на їхні середовища існування. Зусилля повинні бути спрямовані на скорочення викидів парникових газів з метою пом'якшення наслідків зміни клімату та стабілізації екологічних умов. Відновлення прибережної рослинності, такої як мангрові зарості та морські водорості, може пом'якшити зміни солоності та забезпечити середовище існування для морських організмів (Guimbeau et al., 2024).

Аквакультура може скористатися технологічними інноваціями, такими як системи рециркуляційної аквакультури (RAS) та селекційне розведення солестійких видів. Удосконалені моделі моніторингу та прогнозування змін солоності також можуть бути використані для розробки адаптивних стратегій управління, що забезпечать стійкість аквакультури та рибальства до викликів, пов'язаних із солоністю (Rahman & Hung, 2024).

1.2.3. Механізми надходження поживних речовин та евтрофікація

Надлишок поживних речовин, зокрема азоту та фосфору, потрапляє у водні системи через стоки з сільськогосподарських угідь, міські стічні води та промислові стоки. Ці поживні речовини сприяють росту фітопланктону та водоростей, що призводить до цвітіння водоростей, які під час розкладання виснажують запаси кисню (Reister et al., 2024). У Мексиканській затоці надходження 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 надходження поживних речовин через збільшення кількості опадів та екстремальні погодні явища, які сприяють стоку поживних речовин у водойми. Підвищення температури ще більше сприяє евтрофікації, прискорюючи ріст водоростей і змінюючи динаміку екосистеми (Mensah et al., 2025). Ці сукупні ефекти посилюють частоту і тривалість цвітіння водоростей, які виділяють токсини, шкідливі як для морського життя, так і для 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 риб і безхребетних мігрувати або гинути, а бентосні середовища існування страждають від аноксії осаду (Reister et al., 2024). Наприклад, дослідження в затоці Чесапек показують значне зменшення популяцій риб через повторювані гіпоксичні явища (Zhang et al., 2024).



ХАБ створюють додаткові проблеми, виробляючи токсини, які впливають на морські організми та людські популяції. Такі види, як *Karenia brevis* та *Microcystis aeruginosa*, пов'язують із масовою загибеллю риби, забрудненням молюсків та респіраторними проблемами у людей (Mensah et al., 2025). Економічні втрати від ХАБ є значними, особливо для рибальства, туризму та громадського здоров'я.

Стратегії пом'якшення наслідків

Ефективне зменшення навантаження поживними речовинами та евтрофікації вимагає комплексного управління водозбірними басейнами та втручання з боку політики. Зменшення сільськогосподарських стоків за допомогою стійких методів ведення сільського господарства, таких як покривні культури, буферні зони та точне внесення добрив, може значно зменшити надходження поживних речовин (Reister et al., 2024). Міські райони можуть скористатися передовими технологіями очищення стічних вод, які видаляють надлишок поживних речовин перед їх скиданням.

Відновлення водно-болотних угідь та прибережних зон пропонує природні рішення шляхом фільтрації поживних речовин та поліпшення якості води. Крім того, освіта населення та реформи політики, включаючи регулювання управління поживними речовинами та стимули для сталого розвитку, мають вирішальне значення для усунення основних причин евтрофікації (Day et al., 2024).

1.3. Гідрологічні екстремальні явища та їх наслідки для якості води

1.3.1. Причини посух та дефіциту води

Посухи в першу чергу спричинені кліматичними змінами, зокрема зменшенням кількості опадів та підвищенням температури, що посилює евапотранспірацію. Діяльність людини, така як нераціональне водокористування та деградація ґрунтів, ще більше посилює ці природні явища (Zussa et al., 2021). Наприклад, у посушливих регіонах, таких як Саудівська Аравія, десятиліття надмірного видобутку підземних вод та неефективних методів зрошення призвели до виснаження важливих водоносних горизонтів, що посилило наслідки природного дефіциту води (DeNicola et al., 2015).

Зміна клімату посилює ці виклики, змінюючи характер опадів, що призводить до більш частих і сильних посух. Країни Ради співробітництва арабських держав Перської затоки (GCC), що характеризуються гіпераридним кліматом, є особливо вразливими. Швидка урбанізація та зростання населення в цих регіонах збільшують попит на воду, що створює навантаження на і без того обмежені ресурси. Для вирішення цих проблем було прийнято інноваційні стратегії, такі як переробка стічних вод та опріснення, але вони залишаються енергоємними та екологічно обтяжливими (Moussa et al., 2025).

1.3.2. Вплив погіршення якості води

Погіршення якості води часто супроводжується її дефіцитом, оскільки обмежені ресурси все більше забруднюються сільськогосподарськими стоками, промисловими скидами та міськими стоками. Наприклад, надмірне навантаження поживними речовинами в річкових басейнах призводить до евтрофікації, шкідливого цвітіння водоростей та гіпоксичних умов, що порушує



водну екосистему та загрожує біорізноманіттю (Giri, 2021). У Саудівській Аравії екстремальні погодні явища, пов'язані зі зміною клімату, посилюють забруднення води, вводячи патогени та забруднювачі в джерела прісної води (DeNicola et al., 2015).

Соціально-економічні наслідки погіршення якості води є глибокими. Погана якість води ускладнює процеси очищення, підвищує витрати та підриває здоров'я населення. У всьому світі захворювання, що передаються через воду, спричинені забрудненою питною водою, є провідною причиною захворюваності та смертності, особливо в громадах з низьким рівнем доходу (Giri, 2021). У країнах Перської затоки дефіцит води призводить до зниження сільськогосподарського виробництва, що становить загрозу для продовольчої безпеки, підкреслюючи каскадний ефект проблем із якістю води (Moussa et al., 2025).

Стратегії пом'якшення наслідків

Для вирішення подвійної проблеми посухи та погіршення якості води необхідний комплексний підхід, що поєднує технологічні інновації, реформи політики та залучення громад. Сталі практики управління водними ресурсами, такі як збір дощової води та ефективні системи зрошення, мають вирішальне значення для зменшення залежності від надмірно експлуатованих джерел води (Moussa et al., 2025). Відновлення природних екосистем, включаючи водно-болотні угіддя, може поліпшити якість води шляхом фільтрації забруднюючих речовин та регулювання гідрологічних циклів (Zucca et al., 2021).

Прогрес у технологіях опріснення води та очищення стічних вод пропонує потенційні рішення для регіонів, що страждають від нестачі води. Однак ці технології повинні застосовуватися стабільно, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище та забезпечити доступність для вразливих груп населення. Міжнародна співпраця та нарощування потенціалу мають вирішальне значення для обміну знаннями та ресурсами з метою вирішення глобальних проблем у сфері водопостачання (DeNicola et al., 2015).

2. Вплив глобального потепління на аквакультуру

2.1. Екологічна та економічна вразливість видів

2.1.1. Чутливість до температури та вразливість видів

Водні види залежать від стабільної температури води для фізіологічних і метаболічних процесів. Відхилення від оптимальних діапазонів можуть негативно вплинути на ріст, розмноження та виживання. Наприклад, тропічні види, такі як креветки та тілапія, особливо вразливі до коливань температури, які порушують ферментативну активність і метаболічну ефективність (Giri, 2021). Дослідження показують, що тривале перебування в умовах температур, що виходять за межі толерантності виду, може призвести до смертності, спричиненої стресом, та зниження врожайності аквакультури (DeNicola et al., 2015).

У таких регіонах, як Аравійський півострів, де температура води підвищується швидше, ніж у середньому по світу, аквакультура стикається з ускладненими проблемами. Вищі температури не тільки знижують рівень розчиненого кисню, але й підвищують токсичність аміаку, що ще більше загрожує здоров'ю водних організмів (Moussa et al., 2025). Ці ефекти підкреслюють



необхідність адаптивних заходів, таких як селекційне розведення видів, стійких до температурних коливань, та розробка систем аквакультури, що регулюють теплові умови.

Поширення хвороб і паразитів

Підвищення температури води прискорює життєвий цикл патогенів і паразитів, що призводить до більш частих і серйозних спалахів захворювань. Наприклад, захворювання, спричинені бактеріями *Vibrio* spp. і паразитами, такими як морські воші, активно поширюються при підвищеній температурі, що призводить до значних економічних втрат в аквакультурі (Zucca et al., 2021). Зростання поширеності цих загроз було задокументовано на фермах з вирощування креветок у Південно-Східній Азії та фермах з вирощування лосося в Північній Атлантиці, де підвищення температури поверхні моря сприяло поширенню інфекційних захворювань (DeNicola et al., 2015).

Взаємозв'язок між температурою та динамікою захворювань ще більше ускладнюється кліматичними змінами у хімічному складі води, включаючи підкислення та зміни солоності. Ці фактори можуть послабити опірність організму-господаря, роблячи види більш сприйнятливими до інфекцій (Giri, 2021). Отже, ефективне управління захворюваннями в аквакультурі вимагає поєднання вдосконалених систем моніторингу, заходів біобезпеки та досліджень стійких до захворювань штамів.

Стратегії пом'якшення наслідків та адаптації

Для подолання наслідків глобального потепління для аквакультури необхідні проактивні та комплексні стратегії. Технологічні інновації, такі як системи рециркуляційної аквакультури (RAS) та ставки з контрольованою температурою, можуть пом'якшити термічний стрес для водних видів (Moussa et al., 2025). Крім того, впровадження програм вакцинації та вдосконалення технологій виявлення захворювань можуть допомогти в управлінні ризиками, пов'язаними з патогенами.

Політики та зацікавлені сторони також повинні надавати пріоритет охороні навколишнього середовища для стабілізації екосистем. Наприклад, відновлення мангрових заростей та водно-болотних угідь може захистити аквакультурні ферми від впливу коливань температури та забезпечити природну фільтрацію патогенів. Крім того, сприяння міжнародній співпраці в галузі кліматично стійких методів аквакультури буде мати важливе значення для підтримки цієї життєво важливої галузі в умовах мінливих екологічних умов (Zucca et al., 2021).

2.1.2. Економічні наслідки впливу глобального потепління на аквакультуру

Глобальне потепління порушує рівновагу водних екосистем, безпосередньо впливаючи на популяції риб і молюсків. Підвищення температури моря, підкислення та зміна океанських течій змінюють середовища існування та фізіологію водних видів. Наприклад, потепління океану зменшує кількість кисню у воді, що спричиняє стрес для морських організмів і призводить до зниження темпів росту та репродуктивної успішності (Baag & Mandal, 2022). Ці стресові фактори призводять до значного скорочення рибних запасів і врожаю молюсків, що має ланцюговий ефект на прибутковість аквакультури (Doney et al., 2009).



Сукупний вплив потепління та підкислення значно погіршує процеси кальцифікації у молюсків, таких як устриці та молюски. Зниження рівня рН гальмує їх ріст і виживання, ставлячи під загрозу їх доступність для аквакультури. Дослідження показали, що кальцифікуючі організми особливо вразливі до зниження концентрації карбонатних іонів, спричиненого збільшенням вмісту CO₂ в атмосфері (Nienhuis et al., 2010). Як результат, оператори аквакультури стикаються з подвійним викликом: пом'якшення впливу на навколишнє середовище та підтримання рівня виробництва.

Погіршення якості води та спалахи захворювань

Якість води є критичним фактором в аквакультурі, а зміна клімату погіршує її стан. Підвищення температури моря сприяє розмноженню шкідливих водоростей (НАВ), які виснажують запаси кисню і виділяють токсини, шкідливі для водних видів. Ці водорості, що розмножуються завдяки багатим поживними речовинами стокам і потеплінню води, пов'язують з масовою загибеллю риби та економічними втратами в аквакультурі (USEPA, 2014).

Крім того, підвищення температури води прискорює поширення хвороб серед водних видів. Патогени активно розмножуються в теплих умовах, що призводить до збільшення спалахів хвороб в системах аквакультури. Наприклад, дослідження в галузі аквакультури устриць показали, що підвищення температури послаблює імунітет устриць і збільшує їхню сприйнятливість до інфекцій, тим самим знижуючи рівень виживання та обсяги виробництва (Neokye et al., 2024). Ці фактори в сукупності знижують економічну рентабельність аквакультури, збільшуючи рівень смертності та витрати на лікування.

Витрати на адаптацію

Адаптація до викликів, спричинених кліматичними змінами, вимагає значних інвестицій в інфраструктуру та методи управління. Аквакультурні об'єкти повинні використовувати стійкі технології, такі як системи контролю температури та стійкі до хвороб види, щоб підтримувати рівні виробництва. Однак такі адаптаційні заходи пов'язані зі значними витратами, що може створити навантаження на фінансові ресурси операторів аквакультури, особливо в регіонах з низьким рівнем доходів (Naylor et al., 2023).

Зміна географічного розподілу придатних для аквакультури ділянок ще більше підкреслює необхідність адаптаційних заходів. Підвищення рівня моря та екстремальні погодні явища вимагають перенесення аквакультурних господарств у райони з більш стабільними умовами, що збільшує економічне навантаження. Крім того, політика, спрямована на пом'якшення впливу на навколишнє середовище, включаючи більш суворі правила щодо поводження з відходами та використання ресурсів, вимагає інвестицій у заходи щодо дотримання вимог та передові технології (Garlock et al., 2022).

Регіональний та глобальний вплив

Економічні наслідки глобального потепління для аквакультури розподіляються нерівномірно. Регіони з дуже вразливими екосистемами, такі як тропіки, стикаються з більш серйозними проблемами. Висока солоність, посуха та інвазивні види порушують діяльність аквакультури,



особливо для таких видів, як креветки та тілапія. Навпаки, помірні регіони зазнають відносно помірного впливу, але не є імунними до довгострокових наслідків зміни клімату, таких як зміна режиму опадів та збільшення частоти штормів (Mahu et al., 2022).

У глобальному масштабі попит на продукти аквакультури продовжує зростати, що зумовлено зростанням населення та потребою у стійких джерелах білка. Це створює парадоксальну ситуацію, коли сектор аквакультури повинен збільшувати виробництво, щоб задовольнити попит, одночасно борючись з економічними та екологічними витратами, пов'язаними з адаптацією до кліматичних змін. Нездатність вирішити ці проблеми може призвести до поглиблення продовольчої нестабільності та економічних диспропорцій (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 реалізовувати стратегії, спрямовані на підтримку стійких практик та сприяння дослідженням у сфері стійких систем аквакультури. Наприклад, інвестиції в генетичні дослідження з метою виведення видів, стійких до кліматичних змін, та створення систем раннього попередження про цвітіння водоростей можуть зменшити вразливість та підвищити стійкість сектору (Handisyde et al., 2017).

Крім того, інтеграція політики в галузі аквакультури в більш широкі плани дій щодо боротьби зі зміною 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. Географічний перерозподіл та адаптація до кліматичних змін

2.2.1. Зміна зон: перенесення придатних для аквакультури територій

Зміни навколишнього середовища, спричинені зміною клімату, призводять до переміщення зон аквакультури. Підвищення температури океану змушує види та підприємства переміщатися до полюсів, оскільки багато традиційних районів аквакультури стають менш придатними для діяльності через тепловий стрес та погіршення якості води (Zarzyczny et al., 2024). Прикладом цього явища є тропікалізація морських середовищ, коли тропічні види поширюються в помірні регіони, змінюючи структури екосистем і створюючи нові спільноти (Zarzyczny et al., 2024).

Окрім змін температури, на аквакультуру у внутрішніх районах впливають зміни в режимі опадів та доступності прісної води. Наприклад, зменшення водного потоку та підвищення солоності в естуаріях впливає на ріст видів, які залежать від певного рівня солоності (Priya et al., 2023). В результаті аквакультурні підприємства стикаються зі збільшенням витрат, пов'язаних з переїздом до регіонів із більш стабільними та придатними екологічними умовами (Mdoe et al., 2025). Таке перенесення часто вимагає детальної екологічної оцінки для визначення територій, які можуть стабільно підтримувати аквакультуру, мінімізуючи при цьому екологічне погіршення.



Більше того, процес перенесення є не лише технічним, а й соціально-економічним викликом. Багато громад, які залежать від аквакультури як джерела засобів до існування, можуть зіткнутися з вимушеним переселенням або втратою робочих місць у разі перенесення підприємств. Зусилля з пом'якшення таких наслідків вимагають залучення зацікавлених сторін, програм перепідготовки та підтримки альтернативних варіантів засобів до існування.

Інвазивні види: екологічні та операційні порушення

Змінені кліматичні умови сприяють поширенню інвазивних видів, які конкурують з місцевими видами та порушують роботу аквакультури. Наприклад, тропікалізація помірних зон сприяє поширенню інвазивних видів, таких як риба-левиця та певні види водоростей, які можуть витіснити місцеві організми та погіршити стан 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, що сприяє підвищенню температури та глобальній торгівлі, збільшує поширеність спалахів захворювань. Це особливо турбує високоцінні види, такі як креветки та лосось, які вразливі до інфекцій у теплих водах (Ross et al., 2023). Для вирішення цих проблем необхідні значні інвестиції в заходи біобезпеки, включаючи розробку вдосконалених систем моніторингу та створення порід, стійких до патогенів. Для підвищення стійкості до хвороб видів, що вирощуються в аквакультурі, 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 килими, які задушують коралові рифи та зарості морської трави, що є важливими середовищами існування для багатьох морських організмів. Екологічні наслідки виходять за межі аквакультури, впливаючи на рибальство, туризм та загальне морське біорізноманіття.

2.2.2. Стратегії адаптації

Адаптація до цих викликів передбачає поєднання технологічних інновацій, політичних заходів та підходів, заснованих на екосистемах. Основні стратегії включають:

- 1. Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА).** Завдяки включенню видів з різних трофічних рівнів, системи ІМТА пом'якшують вплив інвазивних видів і підвищують екологічну стійкість (Mdoe et al., 2025). Цей підхід також максимізує ефективність використання ресурсів за рахунок переробки поживних речовин всередині системи.
- 2. Генетичні поліпшення.** Розробка порід, які є більш стійкими до коливань температури та хвороб, є важливим кроком у забезпеченні стійкості аквакультурних господарств (Ross et al., 2023). Селективні програми розведення та геномні інструменти використовуються для створення порід риб та молюсків, які можуть процвітати в мінливих умовах навколишнього середовища.
- 3. Покращені системи моніторингу та раннього попередження.** Збір даних у реальному часі та прогнозне моделювання можуть допомогти операторам передбачати зміни умов навколишнього середовища та спалахи інвазивних видів і реагувати на них (Wang et al., 2021).



Наприклад, супутникові знімки та аналітика на основі штучного інтелекту все частіше використовуються для моніторингу температури океану, цвітіння водоростей та інших критичних параметрів.

4. Політика та регулювання. Вкрай важливим є впровадження та забезпечення дотримання надійних політик, що сприяють сталому розвитку та захищають біорізноманіття. Наприклад, політики, спрямовані на управління інвазивними видами та запобігання їх поширенню, можуть зменшити екологічні та економічні збитки (Priya et al.

5. Залучення громади. Успішна адаптація вимагає залучення місцевих громад до процесів прийняття рішень. Надання громадам повноважень через освітні та ініціативи з нарощування потенціалу гарантує, що стратегії адаптації будуть як практичними, так і справедливими.

Регіональні відмінності у впливі

Вплив глобального потепління на зони аквакультури значно відрізняється в різних регіонах. Тропічні регіони, які вже зазнають високих температур, стикаються з найсерйознішими викликами, оскільки стають менш придатними для традиційних видів аквакультури. Навпаки, помірні регіони спостерігають приплив тропічних видів, що відкриває можливості для диверсифікації, але також несе ризики, пов'язані з порушенням рівноваги екосистеми (Zarzyczny et al., 2024).

Прибережні регіони особливо вразливі до підвищення рівня моря та штормових припливів, які пошкоджують інфраструктуру аквакультури та порушують виробничі цикли. У відповідь на це деякі підприємства переносяться у внутрішні або прибережні райони з більш стабільними умовами, хоча такий перехід пов'язаний із значними витратами та логістичними складнощами (Woods et al., 2016). Прибережна аквакультура, хоча і є перспективною, вимагає вдосконалення інженерних рішень, щоб витримувати суворі умови океану та зменшувати вплив на довкілля.

Регіони з сильним управлінням та науковим потенціалом, такі як Північна Європа та Північна Америка, мають кращі можливості для адаптації до цих викликів. Натомість регіони з низьким рівнем доходів, особливо в країнах Південної півкулі, стикаються зі значними перешкодами, зокрема обмеженим доступом до фінансування, технологій та експертних знань. Усунення цих диспропорцій має вирішальне значення для забезпечення глобальної продовольчої безпеки та справедливого розвитку.

Підсумок

Термічна стратифікація та виснаження кисню становлять значну загрозу для водних екосистем, що має серйозні екологічні та економічні наслідки. Розуміння взаємодії фізичних, хімічних та біологічних процесів, що спричиняють ці зміни, є надзвичайно важливим для розробки ефективних стратегій їхнього пом'якшення. Завдяки поєднанню технологічних досягнень та сталого розвитку можна краще контролювати вплив глобального потепління на водні системи.

Підвищення глобальної температури створює значні проблеми для водних видів, збільшуючи їхні метаболічні потреби та спричиняючи проблеми із ростом і розмноженням. Ці фізіологічні



зміни не тільки загрожують окремим видам, але й порушують цілісність екосистем. Всебічне розуміння цієї динаміки в поєднанні з цілеспрямованими заходами щодо пом'якшення наслідків має вирішальне значення для збереження водного біорізноманіття та підтримання якості води в умовах зміни клімату.

Кліматично обумовлені коливання солоності мають значний вплив на прибережні та морські екосистеми, порушуючи розподіл видів та діяльність аквакультури, а також створюючи проблеми для громад, які від них залежать. Для подолання цих наслідків необхідний цілісний підхід, що поєднує екологічні та соціально-економічні аспекти. Завдяки пріоритетності адаптивних стратегій, включаючи практики сталого управління та надійні політичні рамки, можна пом'якшити ці виклики та захистити біорізноманіття та засоби до існування.

Навантаження поживними речовинами та евтрофікація продовжують бути серйозною загрозою для водних екосистем, спричиняючи шкідливе цвітіння водоростей, виснаження кисню та деградацію екосистем. Ефективні стратегії пом'якшення наслідків повинні бути спрямовані на зменшення надходження поживних речовин, відновлення балансу екосистем та сприяння співпраці між зацікавленими сторонами, політиками та вченими для досягнення стійких результатів.

Дефіцит води, що посилюється глобальним потеплінням та діяльністю людини, створює значні виклики для глобальної безпеки водопостачання. Посухи, непередбачувані опади та погіршення якості води становлять значну загрозу як для екосистем, так і для населення. Для пом'якшення цих викликів та захисту життєво важливих водних ресурсів для майбутніх поколінь необхідно надати пріоритет стійким методам управління водними ресурсами, сприяти міжнародній співпраці та впроваджувати інноваційні рішення.

Глобальне потепління також має глибокий вплив на аквакультуру, збільшуючи вразливість видів до коливань температури та підвищуючи 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, що підвищують стійкість та сталість аквакультурної галузі.

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

Список використаних джерел

Andreyeva, 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.cscee.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. <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>



Розділ 2. Екологічні впливи аквакультури з точки зору глобального потепління

**Професор, доктор Власта Бартулович
Доцент, доктор Татяна Доброславич
Університет Дубровника**

Вступ

В умовах зміни клімату екологічний вплив аквакультури викликає дедалі більше занепокоєння, оскільки ця галузь спричиняє викиди парникових газів, руйнування середовищ існування та виснаження ресурсів. Викиди парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю (CO_2), метану (CH_4), оксиду азоту (N_2O) та фторованих газів, суттєво впливають на глобальне потепління, утримуючи тепло в атмосфері Землі. Хоча CO_2 часто перебуває в центрі уваги, CH_4 є надзвичайно потужним парниковим газом, збільшення викидів якого зумовлене людською діяльністю, такою як вирубування лісів, видобуток корисних копалин, спалювання біомаси та промислові процеси (Wróbel та ін., 2023). Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC) наголосила, що вплив людини на зміну клімату є беззаперечним, а індустріалізація та урбанізація призвели до рекордних обсягів викидів парникових газів. Транспорт, енергетика та сільське господарство продовжують робити значний внесок у зміну клімату, впливаючи на погодні умови, рівень моря та біорізноманіття.

Хоча світова аквакультура має ключове значення для продовольчої безпеки, вона також є значним джерелом викидів парникових газів. Енергоємні операції, зміна землекористування, виробництво кормів та управління відходами формують її вуглецевий слід (MacLeod та ін., 2019). Багато підприємств аквакультури залежать від електроенергії, виробленої з викопних видів палива, що збільшує викиди CO_2 , особливо у регіонах, де переважають вугілля, нафта та природний газ (Buja та ін., 2022). Крім того, швидке розширення галузі призвело до трансформації середовищ існування, особливо в екологічно чутливих районах, таких як мангрові ліси та водно-болотні угіддя, що призвело до втрати біорізноманіття та деградації екосистем (Barbier та ін., 2011).

Одним із найзначніших екологічних впливів аквакультури є виробництво кормів, яке становить до 90% від загального обсягу викидів парникових газів у рибництві (FAO, 2022). Вирощування кормів, зокрема рибного борошна та інгредієнтів рослинного походження, потребує великих площ землі, значних обсягів води та енергії, що ще більше погіршує екологічні проблеми. Крім того, аквакультура генерує значну кількість відходів, включно з незіїденими кормами, екскрементами, продуктами метаболізму та хімічними залишками, які



можуть погіршувати якість води та порушувати функціонування водних екосистем (Wu, 1995; Dalsgaard & Krause-Jensen, 2006; Holmer та ін., 2008). Ступінь цих впливів залежить від розташування ферми, вирощуваних видів, щільності посадки та ефективності використання кормів. Із зростанням світового попиту на морепродукти важливою проблемою стає поєднання розвитку аквакультури зі збереженням екологічної сталості. Використання сталих практик в енергозабезпеченні, управлінні земельними ресурсами, виробництві кормів та обробці відходів є необхідним для зменшення вуглецевого сліду галузі та забезпечення її довгострокової екологічної життєздатності..

1. Парникові гази та вуглецевий слід

Викиди парникових газів (ПГ) суттєво впливають на атмосферу Землі, утримуючи тепло. До цих газів належать діоксид вуглецю (CO_2), метан (CH_4), оксид азоту (N_2O) та фторовані гази. Хоча CO_2 часто обговорюють, CH_4 також відіграє важливу роль у глобальному потеплінні. Антропогенні види діяльності, такі як перетворення водно-болотних угідь, захоронення відходів, будівництво дамб, спалювання біомаси, вирубування лісів, видобуток корисних копалин і видобуток газу та вугілля, суттєво збільшили викиди CH_4 . Незважаючи на коротший час перебування в атмосфері, CH_4 є набагато ефективнішим поглиначем тепла, ніж CO_2 (United Nations Environment Programme, 2022). Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC) зазначає, що «вплив людини на кліматичну систему є очевидним, а нещодавні антропогенні викиди парникових газів є найвищими за всю історію». Людська діяльність з часів промислової революції значно підвищила концентрації цих газів, що призвело до зростання глобальних температур і негативних наслідків зміни клімату. Швидка індустріалізація та урбанізація багатьох регіонів ще більше погіршили рівень викидів. Транспортний сектор, виробництво енергії та промислові процеси є значними джерелами викидів CO_2 . Крім того, сільськогосподарський сектор, зокрема тваринництво та рисові поля, є значним джерелом викидів CH_4 та N_2O . Ці викиди мають далекосяжні наслідки, впливаючи на погодні умови, рівень моря та біорізноманіття. Глобальна індустрія аквакультури, хоча і забезпечує сталу альтернативу вилову дикої риби, є значним джерелом викидів парникових газів. Енергоємні операції, зміни у використанні земель, виробництво кормів і управління відходами все це сприяє формуванню вуглецевого сліду аквакультури (MacLeod та ін., 2019).

1.1. Викиди парникових газів у контексті розширення аквакультури

Аквакультура зазнала швидкого зростання в останні десятиліття і стала важливим чинником світового виробництва харчових продуктів. Із зростанням попиту на морепродукти аквакультура стала більш сталою альтернативою традиційному тваринництву. Однак розширення аквакультури також несе із собою екологічні виклики, включно з викидами парникових газів (ПГ), головним чином оксидів азоту (N_2O), метану (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2), що надходять від кормів, споживання енергії у сільському господарстві, добрив та метаболізму тварин (MacLeod та ін., 2019).

Анаеробні умови в ставках аквакультури сприяють утворенню CH_4 через розкладання органічної речовини в умовах дефіциту кисню (Pu та ін., 2022). Крім того, викиди N_2O

пов'язані з мікробною активністю в азотонасичених середовищах, таких як ті, що утворюються внаслідок надмірного внесення добрив або кормів (Вано та ін., 2024).

MacLeod та ін. (2019) дослідили викиди парникових газів у світовій аквакультурі — складному секторі, який охоплює різні види, що вирощуються в різноманітних системах та середовищах. Аналіз зосереджений на основних групах культивованих водних видів, без урахування морських рослин. Китай є найбільшим у світі виробником і споживачем водних продуктів, причому його сектор аквакультури відіграє ключову роль у забезпеченні глобальної продовольчої безпеки (FAO, 2020). Рибогосподарський сектор Індонезії демонструє значне зростання у 2023 році, забезпечуючи близько 3,2% валового внутрішнього продукту (ВВП) країни (Sulistijowati та ін., 2023). Загалом Східна та Південна Азія є найбільшими у світі виробниками парникових газів, на частку яких припадає 90% загального виробництва (Рисунок 2.1).

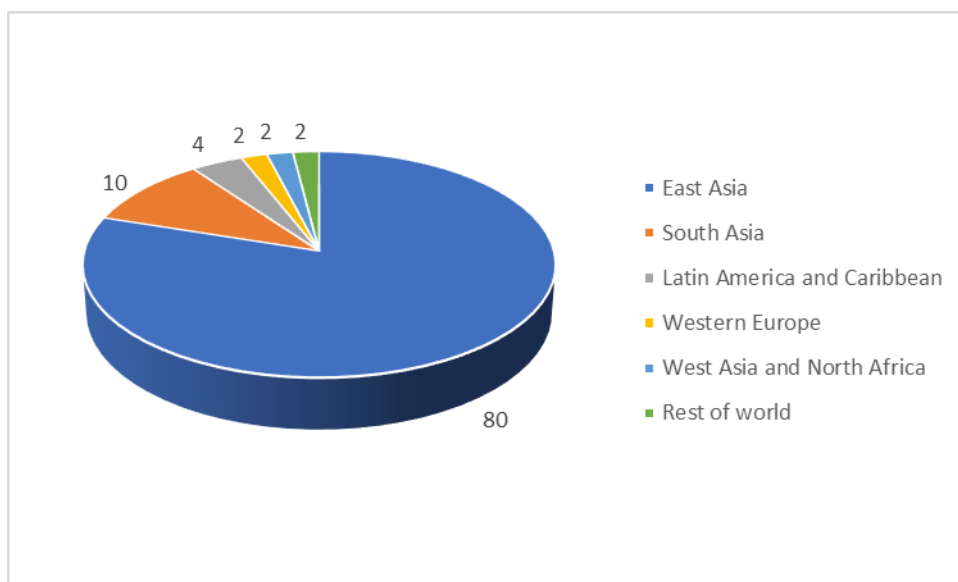


Рисунок 2.1. Відсоткова частка загальних викидів парникових газів за регіонами (MacLeod та ін., 2019)

Під час аналізу даних для різних видів стає очевидним, що виробництво короповіх становить найбільшу частку викидів парникових газів — 33%, за ними йде аквакультура креветок і креветок-панцирників — 18%. Особливо інтенсивні ставки для вирощування креветок мали вищу продуктивність. Крім того, вони спричинили значний екологічний вплив, особливо у прибережних районах, оскільки виробляють значні обсяги метану через анаеробні умови, які часто переважають у мулистих донних відкладеннях ставків (Рисунок 2.2).

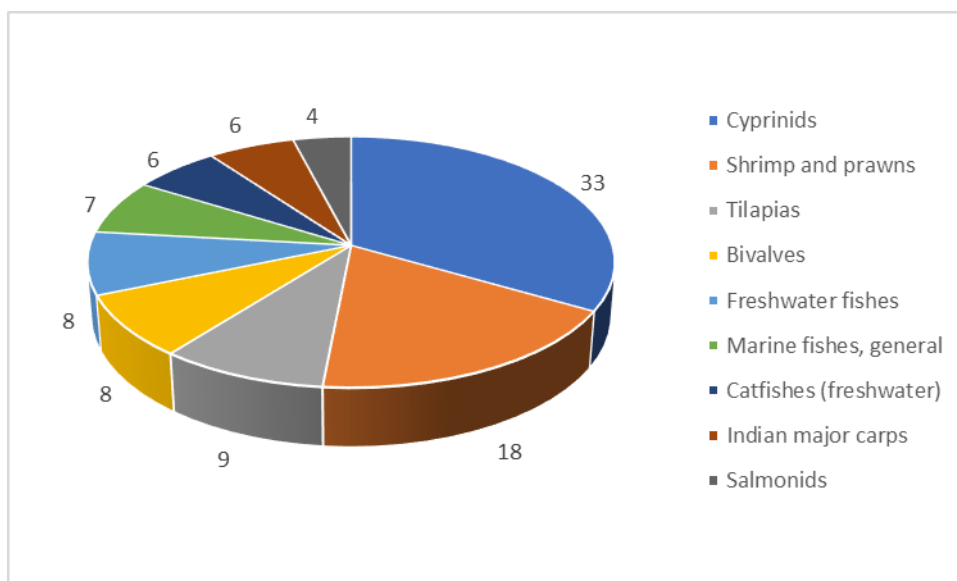


Рисунок 2.2. Відсоткова частка загальних викидів парникових газів за групами видів (MacLeod та ін., 2019)

Після врахування різних газів і їх джерел виробництво водних кормів має найбільший вплив, становлячи 55% усіх парникових газів. Використання сільськогосподарської енергії та водний N_2O також мають значну частку (Рисунок 2.3).

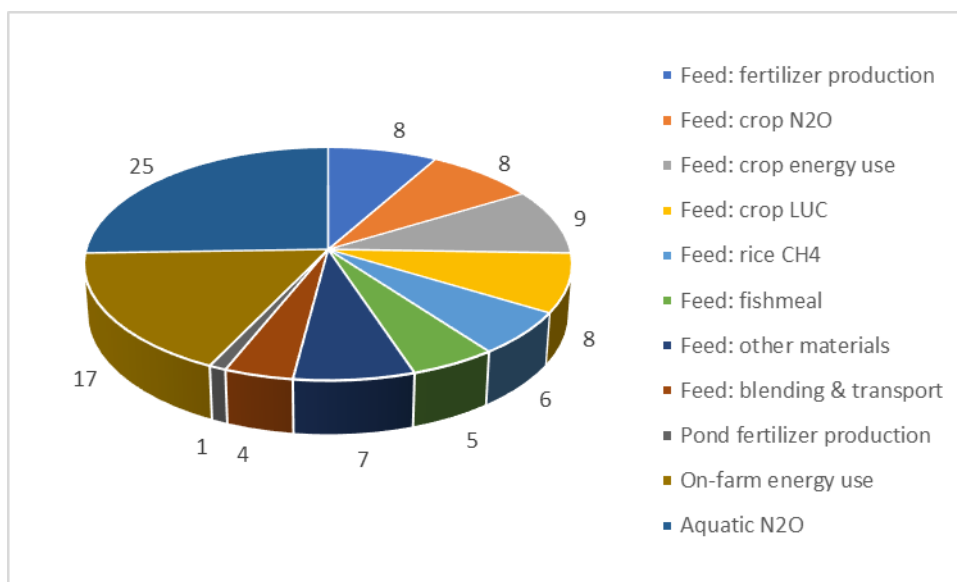


Рисунок 2.3. Відсоткова частка викидів парникових газів за категоріями джерел (MacLeod та ін., 2019)

1.2. Основні джерела парникових газів

N_2O в основному утворюється в результаті мікробного перетворення азоту в ґрунтах під час вирощування культур, а також у результаті мікробного перетворення азотовмісних сполук із кормів та добрив у ставках аквакультури (MacLeod та ін., 2019). МГЕЗК (IPCC, 2007) повідомила про підвищення концентрацій N_2O та CH_4 з часів індустріалізації, що викликає занепокоєння, оскільки обидва ці гази, хоча й присутні у нижчих концентраціях, ніж діоксид



вуглецю (CO_2), мають у 100-річному періоді потенціал глобального потепління, що у 298 разів (для N_2O) і 25 разів (для CH_4) перевищує потенціал CO_2 . Швидкість утворення N_2O визначається кількома фізико-хімічними факторами, такими як температура, солоність та pH, які можуть змінюватися сезонно. Підвищені викиди N_2O з аквакультури були зафіксовані в системах інтенсивного вирощування риби, особливо в Азії, де розширення аквакультури є найбільш значним (FAO, 2020). Дослідження показують, що навіть дрібномасштабна аквакультура може спричиняти викиди N_2O , порівнянні з викидами від сільськогосподарської діяльності (Rahman та ін., 2022).

CO_2 викидається під час споживання енергії до початку експлуатації (переважно пов'язаної з виробництвом кормів і добрив), під час експлуатації (наприклад, перекачування води, споживання електроенергії, використання інших видів палива), а також під час розподілу та переробки після експлуатації. Викиди CO_2 також є результатом змін запасів вуглецю у наземній і підземній біомасі, спричинених землекористуванням і зміною землекористування (LUC) (перетворення луків на ріллю). CH_4 , який головним чином утворюється внаслідок анаеробного розкладання органічної речовини у затоплених рисових полях, може також утворюватися при управлінні відходами рибних господарств (MacLeod, 2019). Рибні господарства генерують органічні відходи, включно з незїденим кормом, екскрементами риби та іншими побічними продуктами. Коли ці матеріали розкладаються в анаеробному середовищі, такому як донні відкладення або погано керовані відстійники відходів, виділяється метан (CH_4) (Pu та ін., 2022).

2. Споживання енергії та сталість

Вуглецевий слід операцій аквакультури безпосередньо пов'язаний із використаними джерелами енергії. У багатьох регіонах операції аквакультури залежать від електроенергії, виробленої з викопного палива, що викидає значні обсяги CO_2 в атмосферу. Вуглецева інтенсивність виробництва електроенергії змінюється залежно від енергетичного балансу конкретного регіону. У районах, де електроенергія переважно виробляється з вугілля, нафти або природного газу, вуглецевий слід операцій аквакультури може бути значним. Використання викопного палива для виробництва енергії в операціях аквакультури безпосередньо сприяє викидам парникових газів. Викиди вуглецю від використання енергії в аквакультурі можуть бути значними, особливо для великих, енергоємних операцій (Li та ін., 2024).

2.1. Джерела енергії та їхній вплив на довкілля

Незважаючи на важливість аквакультури для виробництва продуктів харчування, висловлюються занепокоєння щодо її розширення (Naylor та ін., 2000). Деякі екологічні проблеми, пов'язані з аквакультурою, включають виробництво кормів і скидання в довкілля стічних вод, багатих на поживні речовини, що утворюються внаслідок метаболізму тварин (Thomas та ін., 2021). Екологічна сталість продуктів, процесів або послуг часто оцінюється за допомогою аналізу життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) — методології, визначеної стандартами ISO 14040 та 14044 (ISO, 2006a, 2006b), що дає змогу кількісно оцінити

потенційний екологічний вплив на екосистеми, здоров'я людини та природні ресурси, спричинений продуктами та системами протягом усього їхнього життєвого циклу (Cucurachi та ін., 2019). Використання енергії в аквакультурі має вирішальне значення для підтримання умов, необхідних для росту вирощуваних видів, включаючи циркуляцію води, аерацію, регулювання температури та годування (Таблиця 2.1).

Таблиця 2.1. Використання енергії на різних етапах операцій аквакультури

Операції аквакультури	Потреби в енергії
Інкубатори та розплідники	Контроль температури, освітлення та циркуляція води
Ставкові та резервуарні системи	Аерація, перекачування та фільтрація
Системи рециркуляційної аквакультури (RAS)	Обробка води та регулювання температури
Садкові та офшорні системи	Транспорт човнами, системи годування та збирання врожаю
Виробництво та переробка кормів	Енергоємне отримання інгредієнтів, виробництво та транспортування

Однак ці потреби в енергії, особливо за використання викопного палива, сприяють викидам вуглецю, які посилюють глобальне потепління. Оскільки галузь продовжує розширюватися, розуміння та пом'якшення впливу аквакультури на довкілля, пов'язаного з енергетикою, є вирішальними для забезпечення її довгострокової сталості. Для досягнення сталості в аквакультурі важливо збалансувати вплив на довкілля з використанням енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в операції аквакультури може суттєво зменшити викиди парникових газів (Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2. Основні джерела енергії в аквакультурі

Джерела енергії	Використання
Викопне паливо (дизель, вугілля, природний газ)	Генератори, транспорт і виробничі потужності
Електроенергія	Переважно з невідновлюваних джерел, для живлення водяних насосів, систем аерації та охолодження

Вибір системи господарювання і, зрештою, вибір видів із нижчими вимогами до кормів і якості води може зменшити як вплив на довкілля, так і використання енергії. Енергетичні витрати на виробництво стосуються не лише питань сталості, пов'язаних з ефективністю використання ресурсів екосистеми та виснаженням невідновлюваних ресурсів, але й потенційних витрат для майбутніх поколінь унаслідок екологічних змін, спричинених забрудненням і глобальною зміною клімату (FAO, 2022; Parker та ін., 2018).



2.2. Джерела енергії та їхній вплив на довкілля

Аквакультура є високоенергоємною галуззю, де різні операції потребують значних обсягів енергії для створення оптимальних умов для вирощування видів. Ці операції включають циркуляцію води, аерацію, контроль температури та системи годування, усі з яких необхідні для сприяння росту та здоров'ю водних організмів. Споживання енергії, пов'язане з цими видами діяльності, змінюється залежно від масштабу операції та вирощування видів.

1. Циркуляція води та аерація. Підтримання належного рівня кисню в об'єктах аквакультури має вирішальне значення для здоров'я та виживання риби й молюсків. Системи аерації зазвичай використовуються для підвищення рівня кисню у воді, особливо на об'єктах інтенсивної аквакультури, де велика кількість організмів вирощується у замкнутому просторі. Ці системи потребують значних обсягів енергії, особливо в умовах великомасштабних операцій. Системи циркуляції води також використовуються для забезпечення рівномірного розподілу кисню, поживних речовин і продуктів обміну у воді, що ще більше підвищує потреби в енергії (Tacon & Metian, 2009).

2. Контроль температури. Температура відіграє важливу роль у рості та метаболізмі водних організмів. У деяких регіонах операції аквакультури повинні регулювати температуру води, щоб створити оптимальні умови для вирощування видів. Це особливо актуально в холодніших кліматичних умовах або при розведенні тропічних видів у помірних регіонах. Регулювання температури часто потребує енергоємних систем, таких як нагрівачі, охолоджувачі та теплообмінники. Ці системи є необхідними для підтримання оптимального температурного діапазону води для росту та розмноження, але вони також сприяють високому рівню споживання енергії (Boyd & McNevin, 2015).

3. Системи годування. Автоматизовані системи годування зазвичай використовуються в аквакультурі для оптимізації ефективності годівлі та мінімізації відходів. Ці системи працюють від електроенергії та використовуються для розподілу корму великій кількості риби або молюсків контрольованим способом. Хоча автоматизовані системи годування можуть покращувати коефіцієнт конверсії корму та загальну продуктивність операцій аквакультури, вони також збільшують енергетичні потреби виробництва (Matulić та ін., 2020).

3. Зміна землекористування та перетворення середовищ існування

Оскільки світовий попит на рибу та морепродукти продовжує зростати, поєднання розвитку аквакультури зі збереженням екологічної сталості є основним викликом. Швидке розширення аквакультури призвело до значних змін у землекористуванні та перетворенні середовищ існування, особливо в екологічно цінних екосистемах, таких як мангрові ліси, водно-болотні угіддя та прибережні зони. Ці зміни сприяють втраті біорізноманіття, викидам вуглецю та загальній деградації екосистем, що викликає занепокоєння щодо довгострокової життєздатності аквакультури (Barbier та ін., 2011).

Руйнування мангрів і викиди вуглецю

Втрата або деградація середовищ існування, зокрема прибережних, таких як мангрові системи та інші водно-болотні угіддя (луки морської трави, солончаки, прибережні лагуни, естуарії), є



одним із значних негативних наслідків аквакультури (Wu, 1995; Dev, 1998; Naylor та ін., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Ruiz та ін., 2001; Pérez та ін., 2008). Мангрові ліси, які мають вирішальне значення для прибережних екосистем, є основним джерелом органічної речовини в цих середовищах (Tidwell & Allan, 2001). Вони також є важливими нерестовими середовищами для численних економічно важливих водних видів, а також місцями гніздування та відпочинку для різних інших груп (Paez-Osuna, 2005). Крім того, мангри сприяють захисту узбережжя, затримуючи осади, забруднювачі, азот і вуглець та зменшуючи ерозію (Alongi, 2002; Walters та ін., 2008). Однак швидкість вирубування мангрів оцінюється на рівні 1–2% на рік, причому аквакультура креветок і риби є основною причиною втрати мільйонів гектарів мангрових лісів у таких країнах, як Таїланд, Індонезія, Еквадор і Мадагаскар (Naylor та ін., 2000; Harper та ін., 2007). Дослідження, проведені на морських садкових фермах середземноморського узбережжя, повідомили про знищення/деградацію лук *Posidonia oceanica* внаслідок значного органічного та поживного навантаження від діяльності рибних ферм. Перетворення мангрових лісів на креветкові ферми (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001) головним чином призвело до втрати місць живлення, нересту, укриття та розмноження для широкого спектра морських і наземних тварин (Ruiz та ін., 2001; Pérez та ін., 2008), а також до втрати природного захисту від повеней, штормів і ураганів (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001).

Знищення мангрів для аквакультури не лише позбавляє їх здатності накопичувати вуглець, але й вивільняє накопичений у ґрунті вуглець в атмосферу. За даними Alongi (2015), перетворення мангрових лісів на креветкові ферми призводить до значного збільшення викидів діоксиду вуглецю (CO₂). Оскільки мангрові ліси є одними з найбільш насичених вуглецем екосистем на планеті, накопичуючи до п'яти разів більше вуглецю на гектар, ніж тропічні ліси, їхня втрата є серйозною екологічною проблемою (Barbier та ін., 2011). Крім втрати вуглецю, деградація прибережних водно-болотних угідь підвищує вразливість до ерозії та повеней, послаблює стійкість узбережжя і робить місцеві громади більш вразливими до наслідків зміни клімату (Barbier та ін., 2011).

Перетворення водно-болотних угідь та сільськогосподарських земель

Розширення внутрішньої аквакультури також призвело до значних змін у землекористуванні, зокрема через перетворення сільськогосподарських земель та водно-болотних угідь на об'єкти аквакультури. Під впливом економічних переваг аквакультури, яка часто забезпечує вищу фінансову віддачу, ніж традиційне сільське господарство, таке перетворення спричиняє низку екологічних проблем (Ahmed & Thompson, 2019). Однією з основних проблем є руйнування екосистем, оскільки водно-болотні угіддя, які важливі для фільтрації води, контролю повеней і збереження біорізноманіття, осушуються, щоб звільнити місце для ставків аквакультури. Це призводить до втрати біорізноманіття та знижує здатність ландшафтів справлятися зі змінами довкілля.

Rahman та ін. (2022) демонструють, що перетворення сільськогосподарських земель на ділянки аквакультури призводить до значних і часто незворотних екологічних збитків, що підкреслює необхідність сталих практик землекористування. Крім того, інтенсивна аквакультура може призвести до накопичення органічних відходів, хімічних речовин та



надлишкових поживних речовин у ґрунті та воді, що призводить до евтрофікації. Цей процес, що характеризується надмірною кількістю поживних речовин, спричиняє цвітіння водоростей і виснаження кисню та має серйозні наслідки для водних екосистем (Boyd та ін., 2020).

Фрагментація середовищ існування та втрата біорізноманіття

Розширення аквакультури спричинило фрагментацію середовищ існування, що порушує екологічну зв'язаність і ускладнює здатність видів мігрувати, розмножуватися та отримувати ресурси харчування. Така фрагментація може призвести до скорочення популяцій і втрати біорізноманіття. Введення чужорідних видів для цілей розведення посилює ці ефекти, оскільки вони конкурують із місцевими видами або витісняють їх, що ще більше дестабілізує екосистеми (Chavez та ін., 2020).

Останні дослідження демонструють глибокий вплив фрагментації середовищ існування на біорізноманіття (Marrone та ін., 2023). Перетворення сільськогосподарських земель на ділянки аквакультури призвело до постійних екологічних змін, що підкреслює важливість впровадження сталих практик під час таких трансформацій (Rahman та ін., 2022). Руйнування середовищ існування призводить до скорочення чисельності популяцій і фрагментації ареалів видів, порушуючи переміщення особин між ділянками середовищ існування та зменшуючи їхні шанси на виживання (Haddad та ін., 2015)..

4. Виробництво кормів та використання ресурсів

Виробництво кормів для аквакультури є важливим аспектом галузі, але воно має значний вплив на довкілля. Вирощування інгредієнтів для кормів, таких як рибне борошно та інгредієнти рослинного походження, вимагає значних природних ресурсів, зокрема землі, води та енергії. Це сприяє викидам парникових газів і деградації довкілля. За оцінками, до 90% викидів парникових газів на рибних фермах припадає на виробництво кормів для аквакультури (FAO, 2022). Із зростанням попиту на продукцію аквакультури сталий підхід до виробництва кормів має вирішальне значення для мінімізації впливу на довкілля та забезпечення довгострокової сталості галузі.

4.1. Корм для аквакультури та альтернативні джерела

Різні типи кормів використовуються в аквакультурі для задоволення харчових потреб вирощуваної риби та морепродуктів, забезпечуючи ріст і здоров'я тварин. Традиційно рибне борошно було основним компонентом кормів для аквакультури. Рибне борошно отримують із дрібних пелагічних риб, таких як анчоуси та сардини. Однак через занепокоєння щодо надмірного вилову, виснаження ресурсів та сталості морських екосистем інтерес до альтернативних джерел кормів зростає (Tacon & Metian, 2009).

У відповідь на ці виклики галузь досліджує альтернативні інгредієнти кормів. Рослинні білки, такі як ті, що отримані з сої, кукурудзи та пшениці, є серед найпоширеніших варіантів. Ці інгредієнти розглядаються як потенційні замітники рибного борошна і використовуються у кормах для аквакультури для зниження залежності від морських ресурсів (Duarte та ін., 2020; O'Flynn та ін., 2021). Крім того, білки, отримані з комах, таких як личинки чорної львинки та



борошняних черв'яків, останнім часом з'явилися як перспективна альтернатива. Ці білки комах можна виробляти, використовуючи органічні відходи, що є потенційним рішенням для зменшення потреби у зміні землекористування та мінімізації екологічного впливу (Freda та ін., 2022).

Загалом пошук альтернативних інгредієнтів кормів відображає зростаюче усвідомлення необхідності поєднання рибництва та сталого розвитку. Ця трансформація джерел кормів має на меті зменшити залежність від морських ресурсів, зберігаючи при цьому харчову якість кормів для вирощуваних видів.

4.2. Екологічний вплив виробництва кормів для аквакультури

Екологічний вплив кормів на рослинній основі

Заміна рибного борошна інгредієнтами рослинного походження, такими як соя та кукурудза, знижує тиск на морські екосистеми, але створює нові екологічні проблеми (Tacon & Metian, 2009). Зростаючий попит на ці альтернативи призвів до масштабного перетворення земель, особливо в тропічних регіонах, щоб задовольнити зростаючий попит на сільськогосподарські ресурси (Fargione та ін., 2023). Ця зміна землекористування призвела до значних екологічних наслідків, включаючи вирубування лісів, втрату середовищ існування та зниження біорізноманіття. Тропічні дощові ліси особливо постраждали, оскільки великі площі були розчищені для вирощування таких культур, як соя та кукурудза, які є важливими для виробництва кормів для тварин (Fargione та ін., 2023).

Вплив на зміну клімату та викиди парникових газів

Окрім зміни землекористування, екологічні наслідки виробництва кормів на основі сільськогосподарських культур також посилюють зміну клімату через викиди парникових газів. Перетворення лісів на сільськогосподарські угіддя для виробництва кормів для тварин значно сприяє викидам діоксиду вуглецю (CO_2). Це відбувається не лише безпосередньо через втрату здатності лісів накопичувати вуглець, але й через енергоємні процеси, пов'язані з розчищенням територій і транспортуванням (Soussana та ін., 2021). Крім того, використання синтетичних добрив і пестицидів при вирощуванні сільськогосподарських культур призводить до викидів оксиду азоту (N_2O), потужного парникового газу, що посилює глобальне потепління (Pardoe та ін., 2022). Ці викиди дестабілізують як місцевий, так і регіональний клімат, роблячи галузь аквакультури більш вразливою до кліматичних викликів.

Деградація земель, споживання води та сільськогосподарське біорізноманіття

Оскільки соя є ключовим компонентом багатьох кормів для аквакультури, вона стала значним чинником різних екологічних проблем, особливо щодо деградації ґрунтів, надмірного споживання води та втрати сільськогосподарського біорізноманіття (Magrin та ін., 2020). Швидке розширення монокультур сої викликало занепокоєння щодо ерозії ґрунтів, стоку поживних речовин і підвищеної чутливості до шкідників і хвороб. Ці проблеми часто потребують збільшеного використання хімічних добрив і пестицидів, що ще більше погіршує стан довкілля. Такі практики сприяють забрудненню води та евтрофікації, що завдає шкоди як прісноводним, так і морським екосистемам (Pardoe та ін., 2022). Крім того, знищення цінних



екосистем, таких як водно-болотні угіддя та ліси, для сільськогосподарського розширення порушує локальні вуглецеві цикли, знижує здатність ландшафтів адаптуватися до зміни клімату та підвищує вразливість до екстремальних погодних явищ, включаючи повені та посухи (Fargione та ін., 2023).

Вуглецевий слід та споживання енергії

Крім змін у землекористуванні, великомасштабні сільськогосподарські процеси для виробництва кормів є значним джерелом викидів парникових газів (Soussana та ін., 2021). Енергоємні процеси, пов'язані з перетворенням земель, а також високий попит на добрива та транспортування, сприяють значному вуглецевому сліду. Крім того, обробка рослинної сировини для виробництва рибних кормів часто включає енергоємні процеси, що погіршує вплив на довкілля. Ця проблема особливо гостра, коли у виробничі процеси залучають викопне паливо. У результаті ці екологічні виклики підкреслюють занепокоєння щодо довгострокової сталості альтернативних кормів на рослинній основі в умовах глобальної зміни клімату.

4.3. Вибір кормів і харчування в аквакультурі

Фактори, що впливають на вибір кормів

Вибір корму для вирощуваної риби та ракоподібних залежить від кількох факторів, включаючи харчові звички виду (травоїдні, всеїдні або хижі), ринкову вартість виду та використовувану систему вирощування. Система розведення, чи це земляний ставок, загін, проточний канал або садок, також впливає на вибір корму. Інтенсивні системи потребують спеціально розроблених кормів для оптимізації росту та коефіцієнта конверсії корму (FCR), тоді як екстенсивні системи можуть більше покладатися на природні харчові організми (Тасон та ін., 2013).

Економічні та екологічні аспекти у виборі кормів

Ще одним ключовим чинником є доступність комерційних готових кормів. Якщо такі корми недоступні або непридатні, фермери можуть використовувати корми власного виробництва з місцевих інгредієнтів, таких як низькосортна риба або побічні продукти сільського господарства. Фінансові ресурси фермера, включно з витратами на корми, зберігання та робочу силу, відіграють важливу роль у цьому процесі прийняття рішень (Тасон та ін., 2013). Неефективні стратегії годівлі, такі як перегодовування, можуть призвести до втрати поживних речовин і забруднення довкілля. Тому управління годівлею також має забезпечувати баланс між економічною ефективністю та екологічною сталістю (White, 2013).

Якість кормів і ефективність використання кормів

Важливим завданням в аквакультурі є забезпечення харчових потреб риби через належне нормування кормів, що оптимізує ріст і коефіцієнт конверсії корму (FCR). Енергетичні та харчові потреби видів риб можуть змінюватися щодня, сезонно та між окремими особинами. Незбалансовані раціони, недостатнє або надмірне годування можуть знизити ефективність виробництва і спричинити деградацію довкілля, особливо в садкових господарствах (Bureau та ін., 2006; Thorpe & Cho, 1995). Щоб мінімізувати втрати та досягти як економічної, так і

екологічної сталості, важливо впроваджувати ефективні стратегії управління годівлею (Talbot, Corneillie & Korsøen, 1999; Cho & Bureau, 1998).

Надмірний вилов

Використання диких ресурсів і біорізноманіття для виробництва кормів для аквакультури, а також забезпечення личинок і плідників може завдати значної шкоди водним екосистемам (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001). Дикі види риб із низькою комерційною цінністю, такі як японський анчоус і скумбрія-чубатка, часто використовуються як корм для хижих риб або як додатковий корм для таких видів, як креветки, тилапія та бангус. Ця практика створює додатковий тиск на вже надмірно виловлені запаси диких риб. Вилучення дикої риби, такої як вугор, групер, жовтохвіст і тунець, додатково сприяє виснаженню природних популяцій.

Збирання диких личинок креветок і молюсків є особливо шкідливим, оскільки воно не лише загрожує цільовим видам, але й знищує нецільові організми, включаючи інші види креветок, макрзоопланктон, молодь риб і молюсків. Це порушення харчових ланцюгів впливає на широкий спектр організмів, включаючи водоплавних птахів, рептилій і ссавців, що призводить до підвищеної смертності та зниження успішності розмноження (Choo, 2001). Крім того, вилучення диких видів може призвести до генетичної деградації місцевих популяцій і руйнування природних середовищ існування, що спричиняє подальші порушення водних екосистем (Dev, 1998). Ця проблема є значною для видів, які зазнають інтенсивного промислового вилову та мають низьку репродуктивну здатність. Доки виробництво плідників у неволі залишається дорогим, закупівля диких плідників, ймовірно, продовжуватиметься, завдаючи подальшої шкоди довкіллю (Nash, 2005).

5. Забруднення та залишкові речовини

Об'єкти аквакультури можуть генерувати значні обсяги відходів/стоків, що містять різні речовини, такі як тверді частинки (переважно з незіїденого корму та екскрементів), розчинені продукти метаболізму (від виділення через зябра та нирки) та різні види хімічних речовин (наприклад, лікувальні препарати, добрива, важкі метали), що мають небажані наслідки для довкілля (Wu, 1995; Dev, 1998; Pérez-Osuna, 2001; Read та Fernandes, 2003). Екологічні наслідки, спричинені твердими та розчиненими органічними й неорганічними речовинами (Таблиця 2.3), є значними, оскільки ці сполуки безпосередньо потрапляють у довкілля та впливають як на водну товщу, так і на донні відкладення (Dalsgaard & Krause-Jensen, 2006; Holmer та ін., 2007). Ступінь цих впливів залежить насамперед від розташування ферми, виду тварин, типу культури, щільності посадки, засвоюваності корму та інших чинників ведення господарства, таких як практика годування та стан здоров'я (Wu, 1995).

Таблиця 2.3. Чинники, тиски, стани, впливи та реакції для гіпотетичного розвитку аквакультури (Serpa & Duarte, 2008)

Чинник	Тиск	Стан	Вплив	Реакція
Рибництво	Збільшений потік	Підвищена концентрація поживних і	Збільшення біомаси	Виробництво водоростей для видалення

	поживних речовин	органічних речовин	фітопланктону / евтрофікація	надлишкових поживних речовин
	Збільшений потік органічних речовин, зниження рівня кисню	Знижені рівні кисню. Накопичення органічних речовин у донних відкладеннях	Вища смертність бентосних організмів / зменшення різноманіття бентосу	Аерація дна
	Збільшений опір руху води	Зниження проточності та збільшення часу утримання води	Збільшене осадонакопичення	Перенесення до районів з більш інтенсивною гідродинамікою
	Викиди ксенобіотиків	Біоконцентрація	Підвищена смертність нецільових видів	Менш інтенсивне ведення господарства для зменшення поширення хвороб

Метеорологічні (наприклад, напрямки вітру), гідрографічні (наприклад, батиметрія, течії, припливний режим, хвильова дія, швидкість осадонакопичення) та геоморфологічні характеристики ділянок аквакультури (Nordvang & Hakanson, 2002; Kalantzi & Karakassis, 2006) суттєво впливають на долю будь-яких відходів, що потрапляють у водну товщу.

Стоки від інтенсивних виробничих систем із значним внесенням корму, як правило, мають більш несприятливий вплив, ніж стоки від напівінтенсивних або екстенсивних систем із невеликим або відсутнім внесенням корму (Kautsky та ін., 2000; Pérez-Osuna, 2001).

Відходи аквакультури, включно з незїденим кормом, екскрементами риби та залишками хімічних речовин, мають значний вплив на довкілля. Надлишкові поживні речовини, такі як азот і фосфор, спричиняють забруднення води та евтрофікацію, що призводить до виснаження кисню та утворення шкідливих цвітінь водоростей. Використання хімічних речовин в аквакультурі може призводити до розвитку стійкості до антибіотиків і порушення екосистем, тоді як деградація середовищ існування, наприклад, вирубування мангрів, становить загрозу біорізноманіттю. Вирішення цих проблем вимагає сталих практик, таких як поліпшене управління відходами та екологічно дружні методи ведення господарства, щоб мінімізувати негативний вплив аквакультури на довкілля.



5.1. Скиди поживних речовин

Відходи від аквакультури, особливо незідений корм і екскременти риби, надходять у навколишні води, збільшуючи вміст азоту та фосфору. Це збагачення поживними речовинами може призвести до евтрофікації, що характеризується надмірним цвітінням водоростей, яке виснажує рівень кисню та шкодить водним організмам.

Надходження неорганічних сполук (наприклад, аміаку, нітратів, нітритів і фосфатів) через розкладання органічної речовини, виділення тваринами та удобрення ставків також можуть мати потенційно небезпечні наслідки для навколишнього середовища (Wu, 1995; Dev, 1998; Tovar та ін., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes, 2003; Biao & Kaijin, 2007; Pérez та ін., 2008). Більшість небажаних екологічних наслідків, пов'язаних із надмірною наявністю поживних речовин зі стоків аквакультури, пов'язані з евтрофікацією, включаючи, наприклад, надмірне збагачення поживними речовинами та виснаження розчиненого кисню, що спричиняє погіршення якості води (Tovar та ін., 2000a; Read & Fernandes, 2003). Навантаження поживними речовинами також збільшує запас рослинних поживних речовин у водних системах, стимулюючи ріст первинних продуцентів (Read & Fernandes, 2003; Biao & Kaijin, 2007) і навіть змінюючи структуру та склад цих ключових спільнот.

Якщо збагачення поживними речовинами збігається з певними фізичними умовами та іншими ще недостатньо вивченими факторами, може відбуватися ріст токсичних видів фітопланктону, що призводить до формування шкідливих цвітінь водоростей (Harmful Algal Blooms, HAB) (Biao & Kaijin, 2007). Наприклад, про HAB *Chattonella marina*, імовірно спричинені скидами стічних вод із креветкових ферм, повідомлялося на півночі Жовтого моря в 1993 та 1995 роках (Biao & Kaijin, 2007). Токсичні цвітіння фітопланктону можуть виробляти різні типи токсинів (наприклад, DSP – діареєне отруєння молюсків, PSP – паралітичне отруєння молюсків, ASD – амнезійна хвороба молюсків), які часто викликають отруєння молюсків і загибель донної фауни та дикої/вирощуваної риби, ставлячи під загрозу економічну життєздатність діяльності в аквакультурі (Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes, 2003; Gyllenhamman & Hakanson, 2005). Хоча потенціал для евтрофікації здається малоімовірним у морських садкових господарствах через ефект розбавлення морською водою (Wu, 1995; Pearson & Black, 2001), можливість локальної евтрофікації в районах зі слабким водообміном не можна виключати (Wu, 1995; Pearson & Black, 2001). У районах із обмеженим водообміном, таких як прибережні лагуни та естуарії, надмірна кількість поживних речовин може впливати на продуктивність екосистем і, у деяких випадках, негативно впливати на саму діяльність в аквакультурі (Dev, 1998; Pérez-Osuna, 2001b).

5.2. Вплив антибіотиків і використання хімічних речовин

Використання антибіотиків та інших хімічних речовин в аквакультурі для запобігання захворюванням може призводити до потрапляння залишків у довкілля. Ці речовини можуть порушувати місцеві екосистеми та сприяти розвитку антибіотикорезистентних бактерій. Дослідження показують, що забруднювальні речовини з аквакультури швидко розсіюються у річках. Однак стічна вода з рибних господарств становить менше ніж 1% загальної кількості



завислих речовин, біохімічної потреби в кисні та фосфору, що потрапляють у довкілля. Хімічні речовини, які використовуються в операціях аквакультури, можна класифікувати як: 1) кормові добавки (наприклад, вітаміни, пігменти, мінерали та гормони), 2) дезінфектанти (наприклад, відбілювач, малахітовий зелений) та пестициди (наприклад, молuscoциди та пісцоциди), 3) вапняні матеріали, 4) метали (наприклад, протиобростальні засоби) та 5) ветеринарні препарати, включаючи антибіотики, анестетики, протипаразитарні засоби та вакцини (Read & Fernandes, 2003), що використовуються для контролю зовнішніх і внутрішніх паразитів або мікробних інфекцій (Costello та ін., 2001).

Використання антибіотиків в аквакультурі має кілька негативних екологічних наслідків. Широке використання антибіотиків в аквакультурі може призвести до розвитку антибіотикорезистентних бактерій, які здатні передавати свої гени резистентності іншим бактеріям, включно з тими, що спричиняють хвороби у людей та інших тварин (Okocha та ін., 2018). Антибіотики можуть мати токсичний вплив на спільноти мікроорганізмів у водних середовищах, включно зі спільнотами водоростей, що є важливими для здоров'я водних екосистем (Li та ін., 2024). Крім того, антибіотики та їхні побічні продукти можуть зберігатися у природному середовищі через складність їх біодеградації, накопичуючись у донних відкладеннях, на водних поверхнях і у підземних водах, що призводить до довгострокового забруднення довкілля. Наявність антибіотиків у водних екосистемах може спричиняти суттєві зміни в складі та структурі бактеріальних спільнот, впливаючи на загальний стан і біорізноманіття водних екосистем (Luthman та ін., 2024). Крім того, використання антибіотиків в аквакультурі може призводити до залишкової присутності антибіотиків у рибі та інших продуктах аквакультури, що створює ризики для здоров'я людей, які споживають ці продукти. Безконтрольне використання антибіотиків в аквакультурі також може призводити до порушення нормальної кишкової мікрофлори водних тварин, що негативно позначається на їхньому здоров'ї та рості. Більше того, накопичення антибіотиків у довкіллі може призвести до розвитку патогенів, стійких до антибіотиків, які можуть поширюватися в інші екосистеми та становити загрозу як для водного, так і для наземного життя (Farias та ін., 2024).

Інші біологічні продукти, такі як деструктори органічної речовини (наприклад, бактеріальні та ензимні препарати), також використовуються (Gräslund & Bengtsson, 2001). Застосування цих хімічних речовин в основному залежить від системи розведення. Наприклад, напівінтенсивні креветкові ферми потребують мінімального використання хімічних речовин, переважно добрив і вапняних матеріалів (Boyd & Massaut, 1999; Choo, 2001; Gräslund & Bengtsson, 2001), тоді як зі зростанням інтенсивності виробництва креветок управління стає більш складним, а кількість і різноманіття хімічних сполук істотно зростає (Gräslund & Bengtsson, 2001).

Інтенсивне ставкове господарство також вимагає більшого різноманіття хімічних речовин порівняно з садковими системами, які в основному використовують дезінфектанти, протиобростальні засоби та ветеринарні препарати (Kelly & Elberizon, 2001; Read & Fernandes, 2003). Основні екологічні ризики, пов'язані з використанням хімічних сполук, стосуються: 1) погіршення якості води, 2) втручання у біогеохімічні процеси, 3) прямої токсичності для дикої



флори та фауни, 4) розвитку стійкості патогенних організмів та 5) зменшення профілактичної ефективності лікувальних засобів (Costello та ін., 2001). Неправильне використання хімічних сполук також може поставити під загрозу безпечність продукції аквакультури, становлячи загрозу для здоров'я людей (Choo, 2001; Islam та ін., 2004).

Підсумок

Аквакультура відіграє важливу роль у глобальній продовольчій безпеці; однак її швидке розширення викликало серйозні екологічні занепокоєння, особливо у контексті зміни клімату. Галузь є значним джерелом викидів парникових газів, руйнування середовищ існування та виснаження ресурсів. Діоксид вуглецю, метан і закис азоту виділяються внаслідок енергоємних операцій, виробництва кормів та управління відходами. Багато об'єктів аквакультури залежать від викопного палива для виробництва електроенергії, що збільшує викиди вуглецю, тоді як анаеробні умови у ставках сприяють виділенню метану. Крім того, викиди закису азоту виникають у середовищах, багатих на азот, створених надмірною кількістю кормів і добрив.

Швидке розширення аквакультури також призвело до масштабних змін у використанні земель, особливо в прибережних і водно-болотних екосистемах. Мангри та інші важливі середовища існування були знищені для створення креветкових ферм і рибних ставків, що призвело до втрати біорізноманіття, ерозії узбережжя та зменшення здатності до поглинання вуглецю. Виробництво кормів є одним із найзначніших чинників екологічного сліду аквакультури, на який припадає більшість викидів. Традиційні корми на основі рибного борошна створюють тиск на морські ресурси, тоді як альтернативи рослинного походження, такі як соя, сприяють вирубуванню лісів, деградації земель і надмірному використанню води. Білки з комах та інші новітні джерела кормів пропонують потенційні рішення; однак їх широкомасштабне впровадження все ще обмежене економічними та логістичними викликами.

Ще однією важливою проблемою є утворення відходів, оскільки незіїдений корм, екскременти риб і залишки хімічних речовин спричиняють забруднення води, евтрофікацію та шкідливі цвітіння водоростей, що призводить до виснаження кисню та дисбалансу екосистем. Використання антибіотиків в аквакультурі викликає занепокоєння щодо стійкості до антибіотиків, що може впливати як на водні екосистеми, так і на здоров'я людини.

Вирішення цих проблем вимагає переходу до сталих практик, включаючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії, оптимізацію ефективності використання кормів, впровадження відповідальних стратегій землекористування та реалізацію ефективних рішень з управління відходами. Оскільки глобальний попит на морепродукти продовжує зростати, балансування розвитку аквакультури з екологічною відповідальністю має вирішальне значення для забезпечення довгострокової сталості галузі та мінімізації її екологічного впливу.

Список використаних джерел

- Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The blue revolution and the changing land use pattern in aquaculture development. *Aquaculture Reports*, 14, 100219.
- Alongi, D. M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331–349.
- Alongi, D. M. (2015). The impact of shrimp farming on mangrove ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 56, 1–10.
- Bano, S., Wu, Q., Yu, S., Wang, X., & Zhang, X. (2024). Soil properties drive nitrous oxide accumulation patterns by shaping denitrifying bacteriomes. *Environmental Microbiome*, 19, 94.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. (2011). The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193.
- Biao, X., & Kaijin, Y. (2007). Shrimp farming in China: Environmental impact and sustainability. *Aquaculture International*, 15(5), 21–39.
- Boyd, C. E., et al. (2020). Environmental assessment and management in aquaculture. *Aquaculture International*, 28(2), 697–716.
- Boyd, C. E., & Massaut, L. (1999). Risks associated with the use of chemicals in pond aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 20(2), 113–132.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. Wiley-Blackwell.
- Bujas, T., Koričan, M., Vukić, M., Soldo, V., Vladimir, N., & Fan, A. (2022). Review of energy consumption by the fish farming and processing industry in Croatia and the potential for zero-emissions aquaculture. *Energies*, 15(21), 8197.
- Bureau, D. P., & Cho, C. Y. (2006). Feeding strategies and diet formulation to reduce waste outputs in aquaculture. *Aquaculture Research*, 37(3), 123–135.
- Chavez, J., et al. (2020). Effects of aquaculture on habitat fragmentation and ecosystem dynamics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 452–465.
- Choo, P. S. (2001). Mangroves, shrimps and aquaculture in Malaysia. *Aquaculture Asia Magazine*, 6(2), 5-7.
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (1998). Diet formulation and feeding systems to reduce environmental impact in aquaculture. *Aquaculture Research*, 29(3), 123–135.
- Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., & Tukker, A. (2019). Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth*, 1(3), 292–297.
- Dalsgaard, T., & Krause-Jensen, D. (2006) Monitoring nutrient release from fish farms with macroalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture*, 256, 302–310.
- Dev, A. K. (1998) Fake Blue Revolution: Environmental and Socio-Economic Impacts of Shrimp Culture in the Coastal Areas of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 41, 63–88.
- Duarte, T. A., Correia, D. M., & Silva, J. L. (2020). The role of alternative protein sources in sustainable aquaculture: Plant-based proteins. *Aquaculture Research*, 51(4), 1234–1247.
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. FAO.
- Fargione, J., Tilman, D., & Clark, M. (2023). Agricultural expansion and its impact on biodiversity: A global perspective. *Nature Sustainability*, 6(3), 182–190.
- Farias, D. R., Ibarra, R., Estévez, R. A., Tlustý, M. F., Nyberg, O., Troell, M., Avendaño-Herrera, R., & Norden, W. (2024). Towards Sustainable Antibiotic Use in Aquaculture and Antimicrobial Resistance: Participatory Experts' Overview and Recommendations. *Antibiotics*, 13(9), 887.
- Freda, C. G., Smith, M., & Gupta, M. (2022). Insect protein as a sustainable alternative for aquaculture: An environmental review. *Journal of Insect Science*, 22(1), 10–20.
- Gräslund, S., & Bengtsson, B. E. (2001). Chemicals and biological products used in south-east Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment – A review. *The Science of the Total Environment*, 280(1–3), 93–131.

- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Diez, J. M., Damschen, E. I., & Holt, R. D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on biodiversity. *Nature Communications*, 6, 7926.
- Harper, G. J., Steininger, M. K., Tucker, C. J., Juhn, D. & Hawkins, F. (2007). Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, 34(4), 325–333.
- Holmer, M., Hansen, P. K., Karakassis, I., Borg, J. A., & Schembri, P. J. (2008). Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In M. Holmer, K. Black, C. M. Duarte, N. Marbà, I. Karakassis (eds.), *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, Dordrecht.
- Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007). Sediment biogeochemical changes associated with fish farms in coastal Mediterranean regions. *Environmental Pollution*, 118(2), 313–319.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Islam, M. S., Kabir, M. S., Khan, S. I., Ekramullah, M., Nair, G. B., Sack, R. B., & Sack, D. A. (2004). Wastewater-grown duckweed may be safely used as fish feed. *Canadian Journal of Microbiology*, 50(1), 51–56.
- Kalantzi, I., & Karakassis, I. (2006). Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, 52(5), 484–493.
- Kautsky, N., Berg, H., Folke, C., Larsson, J., & Troell, M. (2000). Ecological footprint and trophic level impact of aquaculture: Implications for sustainability. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 1–12.
- Kelly, L. A., & Elberizon, I. R. (2001). Freshwater finfish cage culture. In K. D. Black (ed.), *Environmental Impacts of Aquaculture* (pp. 1–32). Sheffield Academic Press.
- Li, Z., He, H., Ding, J., Zhang, Z., Leng, Y., Liao, M. & Xiong, W. (2024). Effects of Three Antibiotics on Nitrogen-Cycling Bacteria in Sediment of Aquaculture Water. *Water*, 16(9), 1256.
- Li, H., Liu, H., Zhou, X., Gao, L., Liang, J., Chen, L., Guo, Y., & Liang, S. (2024). Carbon footprint assessment and reduction strategies for aquaculture: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1), n/a.
- Luthman, O., Robb, D. H., F., Jørgensen, P. S., & Troell, M. (2024). Global overview of national regulations for antibiotic use in aquaculture production. *Aquaculture International*, 32, 9253–9270.
- MacLeod, M., Hasan, M. R., Robb, D. H. F. & Mamun-Ur-Rashid, M. (2019). Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626*. Rome, FAO.
- Magrin, G. O., Rojas, S. M., & Tschakert, P. (2020). Soybean monocultures and their environmental impact: A case study of the expansion in South America. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074010.
- Matulić, D., Tomljanović, T., & Piria, M. (2020). Feeding systems in aquaculture: Efficiency and environmental impact. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 11(3), 123–135.
- Marrone, A., Mangano, M. C., Deidun, A., Berlino, M., & Sarà, G. (2023). Effects of habitat fragmentation of a Mediterranean marine reef on the associated fish community: Insights from biological traits analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1957.
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405(6790), 1017–1024.
- Nash, C. E. (2005). *The history of aquaculture*. Blackwell Publishing.
- Nordvang, L., & Håkanson, L. (2002). Predicting the environmental impacts of fish farms using flow models. *Aquaculture International*, 10(5), 359–379.
- O'Flynn, N., FitzGerald, R. J., & Hayes, M. (2021). Plant-based proteins as alternatives to fishmeal in aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 27(3), 123–135.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O. & Adedeji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public Health Rev*, 39, 21.
- Páez-Osuna, F. (2001). The environmental impact of shrimp aquaculture: Causes, effects, and mitigating alternatives. *Environmental Management*, 28(1), 131–140.
- Paez-Osuna, F. (2005). Retos y perspectivas de la camaricultura en ' la zona costera. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 1, 21–31.

- Pardoe, J. R., Leach, D. H., & Minchinton, T. E. (2022). Environmental challenges of plant-based feed ingredients in aquaculture: Implications for water and nutrient management. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111–121.
- Parker, R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8(4), 333–337.
- Pearson, T. H., & Black, K. D. (2001). *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press.
- Pérez, M., Romero, J., & Duarte, C. M. (2008). *Nutrient dynamics in seagrass ecosystems*. Springer.
- Pu, Y., Zhang, Mi., Jia, L., Zhang, Z., Xiao, W., Liu, Shoudong., Zhao, J., Xie, Y & Lee, X. (2022). Methane emission of lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330, 107883.
- Rahman, M., et al. (2022). Land use transformation and environmental consequences of aquaculture expansion in Sundarbans. *Environmental Sustainability*, 25(1), 87–104.
- Read, P., & Fernandes, T. (2003). Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture*, 226(1–4), 139–163.
- Ruiz, J. M., Pérez, M., & Romero, J. (2001). Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: Seagrass decline after organic loading cessation. *Marine Pollution Bulletin*, 42(1), 38–41.
- Serpa, D., Duarte, P. (2008). Impacts of Aquaculture and Mitigation Measures. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, 2, Special Issue 1, 1–20.
- Soussana, J. F., Lemaire, G., & Van de Kuilen, S. (2021). Greenhouse gas emissions from agriculture: Global impact of feed production. *Agricultural Systems*, 181, 102808.
- Sulistijowati, R., Yulianti, L., Komariyah, S. & Musaiyaro, A., (2023). Analysis of Trade, Investment, and Global Value Chain on the Gross Domestic Product of Fisheries Sector in Indonesia. *International Journal of professional business review*, 8(6).
- Sun, Z., Wang, L., Tian, H., Jiang, H., Mou, X., & Sun, W. (2013). Fluxes of nitrous oxide and methane in different coastal Suaeda salsa marshes of the Yellow River estuary, China. *Chemosphere*, 90, 856–865.
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2009). Aquaculture feed and the environment: A global perspective. *Aquaculture*, 292(1–2), 1–13.
- Talbot, C., Corneillie, S., & Korsøen, O. (1999). Optimal feeding strategies for cage farming of salmonids. *Aquaculture International*, 7(2), 123–135.
- Tidwell, J. H., & Allan, G. L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. Ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries. *EMBO Reports*, 2(11), 958–963.
- Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., Nahon, S., & Lecocq, T. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96(2), 767–784.
- Thorpe, J. E., & Cho, C. Y. (1995). Nutritional requirements and feeding strategies for salmonids. *Aquaculture Nutrition*, 1(1), 77–87.
- Tovar, A., Moreno, C., Manuel-Vez, M. P., & Garcia-Vargas, M. (2000). Environmental impacts of intensive aquaculture: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7–12), 550–563.
- United Nations Environment Programme. (2022). *How do greenhouse gases actually warm the planet?* <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-do-greenhouse-gases-actually-warm-planet>
- Walters, B. B., Ronnback, P. J., Kovacs, J. M., Bradley B., Crona, B., Hussain, S. A., Badola, R., Primavera, J. H., Barbier, E., & Dahdouh-Guebas, F. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 220–236.
- White, P. (2013). Environmental consequences of poor feed quality and feed management. In M.R. Hasan and M.B. New, eds. On-farm feeding and feed management in aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 583*. Rome, FAO, 553–564.
- Wróbel, J., Gałczyńska, M., Tański, A., Korzelecka-Orkisz, A., & Formicki, K. (2023). The challenges of aquaculture in protecting the aquatic ecosystems in the context of climate changes. *Journal of Water and Land Development*, 57, 231–241.
- Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166.

Розділ 3. Глобальне потепління та селекція, біотехнології в аквакультурі

Професор, доктор Галина Крусір

Професор, доктор Марина Мардар

Доцент Ольга Сагдєєва

Одеський національний технологічний університет

Вступ

Водні екосистеми, що є важливими для глобального біорізноманіття та засобів до існування людини, зазнають безпрецедентних змін унаслідок глобального потепління. Підвищення температур, спричинене антропогенними змінами клімату, порушує цикли розмноження, рівні виживання та генетичну цілісність водних видів. Одночасно галузь аквакультури долає ці виклики за допомогою інноваційних біотехнологічних рішень. Із зростанням залежності світу від водних ресурсів для забезпечення продовольчої безпеки інтеграція передових селекційних технологій, включаючи відбір за ознаками, геномний відбір і редагування генів CRISPR–Cas9, пропонує трансформаційний потенціал для вирішення подвійної кризи зміни клімату та сталого розвитку аквакультури.

Цей розділ досліджує складну взаємодію між змінами навколишнього середовища та біотехнологічними досягненнями в аквакультурі. Він починається з аналізу того, як глобальне потепління впливає на цикли розмноження та динаміку виживання водних видів, що призводить до значних змін у структурах популяцій та функціонуванні екосистем. Далі увага зосереджена на новаторських біотехнологічних рішеннях, таких як відбір за ознаками та геномний відбір, які підвищують стійкість і продуктивність видів аквакультури. Крім того, розглядається революційна технологія редагування генів CRISPR–Cas9, висвітлюючи її застосування для покращення стійкості до хвороб, швидкості росту та адаптивності до умов довкілля у різних видів риб. Нарешті, аналізуються етичні, екологічні та регуляторні аспекти, що супроводжують ці технології, підкреслюючи потребу у сталих і відповідальних інноваціях в аквакультурі.

Наслідки цих питань є далекосяжними, впливаючи не лише на майбутнє аквакультури, але й на глобальні зусилля щодо зменшення втрат біорізноманіття та впливу зміни клімату. Цей вступ закладає основу для всебічного аналізу викликів і можливостей, що виникають під час інтеграції біотехнологій в аквакультуру в умовах глобального потепління..



1. Зміна клімату та розмноження видів

1.1. Зміни у циклах розмноження

Глобальне потепління, спричинене зміною клімату внаслідок діяльності людини, справляє глибокий вплив на екосистеми по всьому світу, включно з водними середовищами. Однією з найбільш значущих сфер, на які впливає підвищення температури, є розмноження водних видів. Зміни температури води змінюють цикли розмноження, час нересту, темпи росту та рівні виживання потомства, що призводить до змін у структурі та функціонуванні водних популяцій. Цей огляд літератури має на меті дослідити, як зміни навколишнього середовища впливають на водні види, зосереджуючись на змінах у циклах розмноження та генетичній адаптації.

Зміни у циклах розмноження. Підвищення температури води внаслідок глобального потепління є одним із головних чинників змін у репродуктивній поведінці водних видів. Багато видів покладаються на специфічні температурні сигнали для ініціювання розмноження. Із підвищенням температури час розмноження зміщується, і ці зміни можуть призвести до невідповідності між видами та їхніми середовищами існування.

Час нересту. Дослідження показали, що багато водних видів розмножуються раніше протягом року через підвищення температури води. Наприклад, спостерігалось, що такі види риб, як атлантична тріска (*Gadus morhua*) та європейський окунь (*Perca fluviatilis*), нерестяться раніше в сезоні у відповідь на підвищення температури води (Tompkins та ін., 2017). Хоча ранній нерест може здаватися корисним, він часто призводить до невідповідності з наявністю кормових ресурсів для личинок, оскільки фітопланктон, основне джерело їжі для багатьох молодих риб, може бути недоступний у цей самий час (Durant та ін., 2007). Це може призвести до зниження рівня виживання потомства, що ще більше впливатиме на динаміку популяцій.

Більше того, ранній нерест не обов'язково гарантує успіх, оскільки види можуть нереститися до настання оптимальних умов для виживання личинок. Невідповідність у часі може призводити до зменшення кількості життєздатного потомства, що потенційно може викликати довгострокове скорочення популяцій (O'Reilly та ін., 2008).

Темпи росту та метаболічні ефекти. Підвищення температури води також впливає на метаболічні показники водних видів. Тепліші температури зазвичай прискорюють ріст багатьох видів шляхом підвищення метаболізму (Angilletta та ін., 2004). Однак таке збільшення темпів росту не завжди є корисним. Види, які ростуть занадто швидко в тепліших водах, можуть не досягти необхідних розмірів або міцності, щоб вижити до дорослого віку, що призводить до появи слабших особин із меншими шансами на успішне розмноження (Heath та ін., 2014). Крім того, швидший ріст не завжди корелює зі збільшенням репродуктивного успіху, оскільки види можуть зіткнутися з невідповідністю між етапами свого розвитку та умовами навколишнього середовища.

Рівень виживання личинок. Ранні стадії життя водних видів часто є найбільш уразливими до змін навколишнього середовища, і підвищення температури води може ще більше посилювати ці вразливості. Підвищені температури можуть знижувати рівень кисню у воді,



що впливає на виживання личинок, яким необхідні високі концентрації кисню для належного розвитку (Pörtner та ін., 2014). Крім того, підвищені температури можуть викликати стрес у молодих організмів, роблячи їх менш здатними справлятися з іншими екологічними проблемами, такими як хижацтво або дефіцит їжі (Walther та ін., 2002).

1.2. Генетична адаптація до зміни клімату

Хоча зміни в навколишньому середовищі створюють проблеми для водних видів, деякі з них мають потенціал генетично адаптуватися до цих умов, що змінюються. Генетична адаптація передбачає зміни в генетичному складі популяцій з часом, які дозволяють видам справлятися з екологічними стресорами, включаючи підвищення температури.

Адаптація до змін температури. Дослідження показали, що окремі види виявили певний рівень генетичної адаптації до зростання температур. Наприклад, дослідження атлантичної тріски виявили докази локальної адаптації до різних температурних умов у різних географічних районах (Jorgensen та ін., 2017). Деякі популяції тріски, що мешкають у тепліших водах, розвинули генетичні ознаки, які дозволяють їм успішно нереститися за вищих температур. Аналогічно, деякі види риб можуть демонструвати зміни у термінах розмноження або фізіологічній толерантності, пристосовуючись до тепліших умов протягом кількох поколінь (Lynch та ін., 2014).

Однак здатність видів до генетичної адаптації обмежується такими факторами, як генетичне різноманіття та швидкість, з якою відбуваються зміни навколишнього середовища. Види з низьким рівнем генетичного різноманіття або ті, що живуть у середовищах, які швидко нагріваються, можуть мати труднощі з достатньо швидким пристосуванням, щоб уникнути скорочення популяцій (Fischer та ін., 2014). Крім того, процес генетичної адаптації є повільним, і темпи потепління можуть перевищувати здатність деяких видів швидко адаптуватися.

Зниження успішності розмноження та скорочення популяцій. Хоча деякі види можуть успішно адаптуватися до підвищення температур, інші можуть зіткнутися з проблемами, що знижують їхню репродуктивну успішність або призводять до скорочення чисельності популяцій. Наприклад, види зі спеціалізованими вимогами до розмноження, такі як ті, що залежать від певних діапазонів температур для нересту, можуть мати труднощі з адаптацією до швидких температурних змін, спричинених глобальним потеплінням (Parmesan, 2006). У таких випадках успішність розмноження може знижуватися, а чисельність популяцій може скорочуватися або навіть призводити до локального вимирання.

Види, які не адаптуються генетично до підвищення температур, можуть бути нездатними успішно розмножуватися у своїх природних середовищах існування, що призведе до втрати генетичного різноманіття і ще більше зменшить їхні шанси на виживання в умовах зміни клімату (Chevin та ін., 2010).

Вплив глобального потепління на розмноження водних видів є багатогранним і включає зміни у циклах розмноження, зміни темпів росту та зміни рівня виживання потомства.

Підвищення температур призвело до більш раннього нересту багатьох видів, але це може спричинити невідповідність із наявністю їжі та оптимальними умовами довкілля, що призводить до нижчого рівня виживання личинок. Хоча деякі види можуть генетично адаптуватися до змінних температур, швидкість зміни навколишнього середовища може перевищувати їхню здатність до адаптації, що призводить до зниження успішності розмноження і потенційного скорочення популяцій. Потрібні подальші дослідження, щоб зрозуміти довгострокові наслідки цих змін для водних екосистем і розробити стратегії пом'якшення впливу зміни клімату на ці види.

2. Передові методи селекції

2.1. Відбір за ознаками

Аквакультура є швидкозростаючим сектором, який робить значний внесок у глобальну продовольчу безпеку. У міру продовження зміни клімату аквакультура стикається зі зростаючими викликами, такими як підвищення температури та більш часті екстремальні погодні явища. Щоб вирішити ці проблеми, дедалі ширше застосовуються біотехнологічні досягнення, зокрема відбір за ознаками та геномний відбір, для розробки видів аквакультури, більш стійких до кліматичних стресорів.

Відбір за ознаками протягом десятиліть є наріжним каменем аквакультури, підвищуючи продуктивність і стійкість вирощуваних видів. Процес полягає у відборі особин із бажаними ознаками для розмноження, що поступово покращує генетичний склад популяцій. Традиційний відбір за ознаками в аквакультурі був зосереджений на таких ознаках, як швидкість росту, стійкість до хвороб і ефективність використання корму. Із посиленням екологічних стресорів, пов'язаних зі зміною клімату, зростає увага до відбору ознак, що забезпечують більшу стійкість до підвищених температур води та інших кліматичних викликів.

Дослідження показали, що відбір за ознаками може допомогти видам аквакультури, таким як риби та молюски, адаптуватися до тепліших умов. Наприклад, дослідження атлантичного лосося показали, що відбір за ознаками може підвищити терmostійкість, що потенційно дозволить вирощуваним популяціям виживати в тепліших водах, спричинених зміною клімату (Gjøen та ін., 2018). Крім того, програми відбору дедалі більше зосереджуються на таких ознаках, як стійкість до хвороб і здатність витримувати гіпоксичні умови, які, ймовірно, ставатимуть поширенішими в умовах підвищення температур води (Houston та ін., 2018).

Відбір за ознаками для кліматичної стійкості також включає вдосконалення поведінкових ознак. Наприклад, риби, що демонструють вищу толерантність до стресорів, таких як скупченість і обробка, краще витримують жорсткіші умови, спричинені зміною клімату (Huntingford та ін., 2020). Ці програми відбору спрямовані на забезпечення того, щоб види аквакультури могли продовжувати успішно розвиватися в умовах змінного клімату, сприяючи довгостроковій сталості.



2.2. Геномний відбір

Використання сучасних біотехнологій для підвищення продуктивності водних видів має великий потенціал не лише для задоволення попиту, але й для вдосконалення аквакультури. Генетична модифікація та біотехнології також мають величезний потенціал для покращення якості та кількості риби, вирощуваної в аквакультурі. Зростаючий попит на аквакультуру може бути задоволений завдяки біотехнологіям. Як і всі харчові продукти, отримані завдяки біотехнологіям, продукція аквакультури підлягає суворому регулюванню перед її допуском на ринок. Біотехнологічна аквакультура також пропонує екологічні переваги. При належній інтеграції з іншими технологіями виробництва продуктів харчування, сільськогосподарських продуктів і послуг біотехнології можуть суттєво допомогти в задоволенні потреб зростаючого та дедалі більш урбанізованого населення в наступному тисячолітті. Успішний розвиток і застосування біотехнологій можливі лише за наявності широкої дослідницької та наукової бази в біології, варіативності, селекції, агрономії, фізіології, патології, біохімії та генетиці організму, що модифікується. Переваги, які пропонують нові технології, неможливо реалізувати без постійного зобов'язання щодо проведення фундаментальних досліджень. Біотехнологічні програми повинні бути повністю інтегровані в наукове підґрунтя та не можуть бути відірвані від контексту, якщо вони мають бути успішними.

Рисунок 3.1 показує роль біотехнологій у підвищенні виробництва риби.

Геномний відбір, який використовує геномні інструменти для виявлення та поширення бажаних ознак, є значним кроком уперед у селекції для аквакультури. Цей метод передбачає пов'язування генетичних маркерів із ознаками, що становлять інтерес, що дає змогу ефективніше здійснювати відбір. Геномний відбір може прискорювати селекційні програми, дозволяючи селекціонерам виявляти особин із найкращим генетичним потенціалом для стійкості до екологічних стресорів.

Одним із найперспективніших застосувань геномного відбору в аквакультурі є підвищення термостійкості. Дослідження райдужної форелі (*Oncorhynchus mykiss*) показало, що геномний відбір може бути використаний для виявлення маркерів, пов'язаних із термостійкістю, що дає змогу розробляти породи, краще пристосовані до виживання в тепліших водах (Liu та ін., 2020). Завдяки застосуванню геномного відбору у селекційних програмах види аквакультури можуть бути генетично пристосовані до успішного розвитку в умовах, де очікується підвищення температури через зміну клімату.

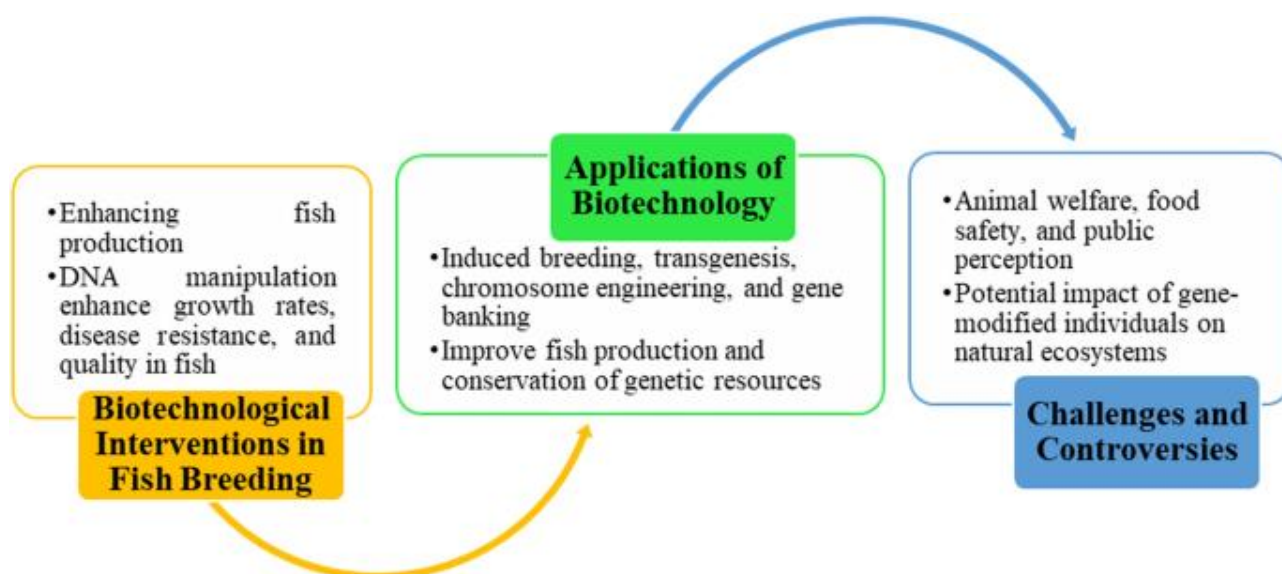


Рисунок 3.1. Роль біотехнологій у підвищенні виробництва риби (Yang та ін., 2021)

Окрім термостійкості, геномний відбір використовується для покращення інших ознак, пов'язаних зі зміною клімату, таких як стійкість до хвороб і здатність виживати в умовах з низьким вмістом кисню. Наприклад, геномні інструменти застосовуються для виявлення генетичних маркерів, пов'язаних зі стійкістю до патогена *Vibrio anguillarum*, який становить значну загрозу для видів аквакультури у тепліших водах (Vázquez та ін., 2018). Використовуючи геномний відбір для розведення риб, більш стійких до хвороб, системи аквакультури можуть стати більш сталими та менш залежними від антибіотиків, які дедалі частіше піддаються критиці через їхній вплив на довкілля.

Геномний відбір також інтегрується з традиційним відбором за ознаками для максимізації генетичного прогресу. Поєднання геномної інформації з фенотиповими даними дає змогу селекціонерам приймати більш обґрунтовані рішення щодо відбору особин для розмноження. Наприклад, геномні дані можна використовувати для прогнозування майбутньої продуктивності потомства, що допомагає уникати проблем, таких як інбридинг, та забезпечує довгострокове генетичне здоров'я популяцій аквакультури (Gjøen та ін., 2018).

Інтеграція відбору за ознаками та геномного відбору. Інтеграція відбору за ознаками та геномного відбору розглядається як потужна стратегія забезпечення стійкості видів аквакультури перед обличчям зміни клімату. Відбір за ознаками створює надійну основу, покращуючи такі ознаки, як швидкість росту та стійкість до хвороб, тоді як геномний відбір прискорює процес і підвищує точність селекційних програм. Разом ці методи дають змогу швидко розробляти породи, краще пристосовані до змінних умов довкілля.

У випадку атлантичного лосося, наприклад, і відбір за ознаками, і геномний відбір використовувалися для створення порід, більш стійких до підвищених температур і хвороб (Gjøen та ін., 2018). Поєднання цих двох підходів має потенціал значно підвищити сталість аквакультури шляхом створення порід, здатних успішно розвиватися в тепліших і більш мінливих екологічних умовах.



Виклики та майбутні напрями. Хоча біотехнологічні досягнення мають великий потенціал для вдосконалення селекції в аквакультури, існують певні виклики, які необхідно подолати. Одним із ключових занепокоєнь є потенційна генетична гомогенізація у вирощуваних популяціях, що може призвести до інбридинг-депресії та зниження генетичного різноманіття. Для ефективної адаптації видів аквакультури до майбутніх змін довкілля надзвичайно важливо ефективно управляти генетичним різноманіттям (Houston та ін., 2018).

Крім того, впровадження геномного відбору вимагає значних інвестицій у геномні ресурси, включаючи створення високоякісних референсних геномів і генетичних маркерів. Хоча геномні інструменти останніми роками стали більш доступними, вартість і складність цих інструментів залишаються перешкодою для деяких галузей аквакультури (Huntingford та ін., 2020).

Попри ці виклики, подальший розвиток геномних технологій у поєднанні з прогресом у сфері обчислювальних інструментів і селекційних стратегій має великий потенціал для підвищення стійкості видів аквакультури до зміни клімату.

Біотехнологічні досягнення у селекції для аквакультури, включаючи відбір за ознаками та геномний відбір, пропонують перспективні рішення проблем, пов'язаних зі зміною клімату. Підвищуючи стійкість видів аквакультури до підвищення температур, хвороб та інших екологічних стресорів, ці технології можуть допомогти забезпечити сталість галузі. Інтеграція геномного відбору з традиційними підходами до селекції, ймовірно, стане ключовою стратегією для створення більш кліматостійких порід риб і моллюсків. Оскільки сектор аквакультури продовжує відчувати тиск зміни клімату, ці біотехнологічні інновації відіграватимуть критичну роль у забезпеченні того, щоб аквакультура залишалася життєздатним і сталим джерелом харчових продуктів для світового населення.

3. Генна інженерія та CRISPR

3.1. Генна інженерія в аквакультури

Використання біотехнологічних методів для поліпшення добробуту вирощуваних організмів, підвищення продуктивності та захисту водних екосистем дало обнадійливі результати. До них належать вакцини та імуностимулятори, пробіотики, пребіотики, симбіотики, парапробіотики, фагова терапія, антимікробні пептиди, генная терапія, інтерференція РНК та інші біотехнологічні методи лікування. Генетичні досягнення в аквакультури відіграють важливу роль у підвищенні продуктивності, зниженні виробничих витрат і мінімізації впливу на довкілля.

Приклади методів редагування геномів риб включають CRISPR–Cas9, нуклеази, активовані ефектором транскрипційного активатора (TALENs), та нуклеази цинкових пальців. Молекулярна біологія та трансгенез, генне банкування, маніпуляції з хромосомами, гормональні обробки, вирощування риб із одним або кількома батьками, створення риб із різною кількістю клітин (поліплоїдні, триплоїдні, гаплоїдні, гіпогенетичні та андрогенетичні), а також використання синтетичних гормонів у риборівництві — це інші методи, які використовуються у біотехнології риб.

Інновації в біотехнологічних технологіях революціонізували генетичну селекцію риб, призвівши до значних досягнень в індустрії аквакультури (Yang та ін., 2021).

Такі методи, як генна інженерія та CRISPR–Cas9, дали змогу здійснювати точну модифікацію геномів риб, що призвело до отримання порід із підвищеними темпами росту, стійкістю до хвороб і поліпшеним коефіцієнтом конверсії корму. Програми відбору за ознаками були оптимізовані завдяки відбору, що ґрунтується на маркерах, що дозволило ефективніше ідентифікувати та поширювати бажані генетичні ознаки. Крім того, репродуктивні технології, включаючи гормонально індукований нерест і кріоконсервування гамет, підвищили успіх розведення та генетичне різноманіття. Ці біотехнологічні досягнення сприяли більш сталим і продуктивним практикам рибництва, що відповідають зростаючому світовому попиту на морепродукти.

Ці інструменти відіграють важливу роль у запобіганні зникненню видів риб, що перебувають під загрозою, і підвищенні комерційного виробництва риби. Крім того, інші біотехнологічні методи, такі як використання синтетичних гормонів, виробництво особин однієї статі та трансгенез, сприяють розвитку розведення риб. Ці інструменти відіграють важливу роль у запобіганні зникненню видів риб, що перебувають під загрозою, і підвищенні комерційного виробництва риби. Крім того, інші біотехнологічні методи, такі як використання синтетичних гормонів, виробництво особин однієї статі та трансгенез, значно сприяють розвитку розведення риб.

Рисунок 3.2 показує різні біотехнологічні інновації в розведенні риб (Sankaran & Mandal, 2024).

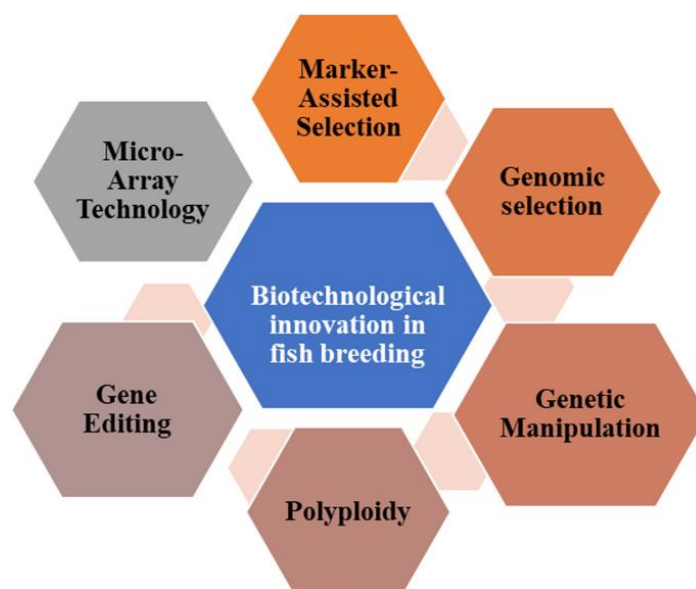


Рисунок 3.2. Біотехнологічні інновації у розведенні риб

Генетичне різноманіття є значним ресурсом, який можна використовувати для започаткування програм відбору за ознаками, що довели свою ефективність у значному підвищенні продуктивності сектору аквакультури. Полегшення передачі навчання та технологій між



різними секторами аквакультури може значно сприяти підвищенню продуктивності та сталості видів із нижчою комерційною цінністю.

Геном організму можна модифікувати шляхом вставлення синтетичної ДНК, створеної з різних джерел, за допомогою процесу, відомого як технологія рекомбінантної ДНК. Імплантація генетичного фрагмента, що містить цільовий ген, у вже існуючий геном є першим кроком цієї процедури. У цьому методі як інструменти використовуються рестрикційні ферменти, вектори та клітини-господарі. У процесах розрізання, синтезу та зшивання задіяні різні ферменти. До цієї групи належать такі ферменти, як рестрикційні ферменти. Для перенесення та інтеграції цільових генів вектори є корисним інструментом.

Застосування технології рекомбінантної ДНК включає клонування генів, геннотерапію та сільське господарство.

Рисунок 3.3 показує різні етапи, що охоплюються технологією рекомбінантної ДНК (Sankaran & Mandal, 2024).

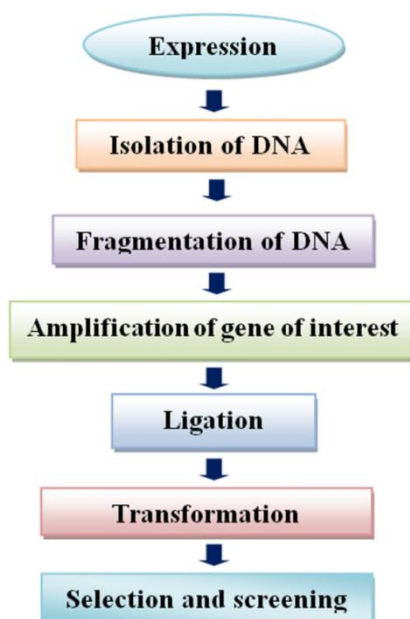


Рисунок 3.3. Основні етапи, що охоплюються технологією рекомбінантної ДНК (Sankaran & Mandal, 2024)

3.2. CRISPR в аквакультурі

CRISPR–Cas9 є революційним інструментом у генній інженерії, що забезпечує точні та спрямовані модифікації ДНК риб для поліпшення таких ознак, як пігментація, ріст, якість м'яса та стійкість до хвороб. Ця технологія перевершує традиційні методи селекції, пропонуючи більш економічний, простий і точний підхід до генетичного вдосконалення. Її застосування включає поліпшення показників росту (наприклад, маси тіла, довжини та розвитку м'язів), підвищення якості м'язової тканини, збільшення стійкості до хвороб і полегшення визначення статі. Крім того, CRISPR–Cas9 пропонує перспективні рішення для підвищення стійкості до хвороб шляхом націлювання на гени, пов'язані з імунною системою, та шляхи розпізнавання патогенів, що зменшує потребу в антибіотиках і хімічних обробках.

Ця технологія суттєво просунула аквакультуру шляхом генетичної оптимізації ключових ознак видів риб. Наприклад, дослідники успішно маніпулювали статевими клітинами атлантичного лосося для контролю диференціації репродуктивних клітин, поліпшили коефіцієнт конверсії корму для росту в жовтого сома, досягли цільових генетичних модифікацій у тилапії та мінімізували небажані побічні ефекти (Zhu та ін., 2024).

Рисунок 3.4 показує методи CRISPR–Cas9, що застосовуються в редагуванні генів. Фермент Cas9 і направляюча РНК є двома основними частинами цієї системи. Основа системи CRISPR–Cas9 — це спрощений варіант противірусної захисної системи, що існує в бактеріях. Внутрішньоклітинне редагування генів можливе завдяки введенню синтетичної направляючої РНК (gRNA), що утворює комплекс із нуклеазою Cas9, у клітину з подальшим розрізанням геному в певному місці. Оскільки ця технологія забезпечує легке, доступне та точне редагування геному *in vivo*, вона має велике значення в біотехнології та медицині.

Окрім потенційної корисності у боротьбі зі шкідниками та управлінні хворобами, ця технологія має й інші можливі застосування — у розробці нових сільськогосподарських продуктів, генетично модифікованих організмів та фармацевтичних препаратів. Крім того, вона демонструє перспективність у лікуванні спадкових хвороб і розладів, викликаних соматичними мутаціями, включаючи рак. Система CRISPR–Cas9 забезпечує простий, керований РНК метод індукції цільових змін у конкретних ділянках. Деякі фенотипи, такі як колір очей або схильність до хвороб, можуть бути індуковані за допомогою цих змін ДНК. Система використовує РНК-молекули, спроектовані для відповідності цільовим послідовностям ДНК, у поєднанні з ферментом нуклеазою Cas9.

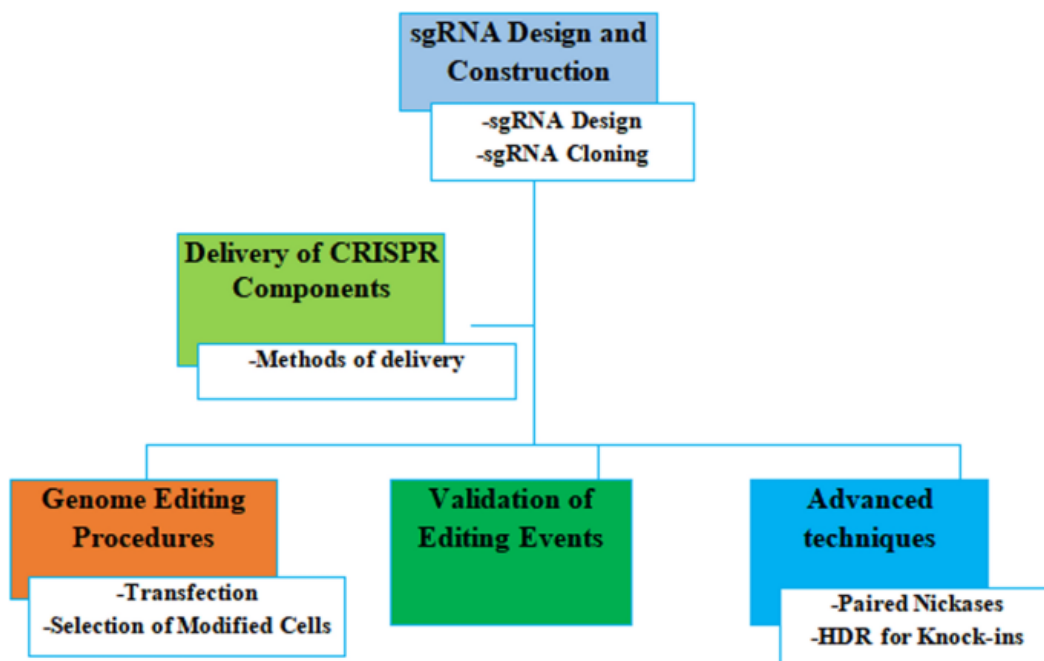


Рисунок 3.4. Редагування генів CRISPR–Cas9 (Sankaran & Mandal, 2024)



Хоча CRISPR–Cas9 має потенціал революціонізувати галузь генної інженерії, ця технологія не позбавлена обмежень. Точність редагування геному є важливим питанням, оскільки воно призводить до постійних змін у геномі. Крім того, її використання для модифікації людської зародкової лінії є надзвичайно суперечливим. Загалом застосування редагування генів CRISPR–Cas9 може революціонізувати галузі біотехнології та медицини. Однак необхідно виявляти обачність і враховувати етичні наслідки, пов'язані з його застосуванням (Sankaran & Mandal, 2024).

3.2.1. Стійкість до хвороб

Стійкість до хвороб є критично важливою ознакою в аквакультурі, що відображає здатність виду витримувати інфекції, погану якість води та зміни в навколишньому середовищі. Редагування геному за допомогою CRISPR–Cas9 стало потужним методом підвищення цієї стійкості. Інтегруючи гени антимікробних пептидів (AMGs) у геноми риб, CRISPR–Cas9 зменшує колонізацію бактеріями, підвищує виживання після інфекції та змінює експресію генів, пов'язаних з імунною системою. Це точне редагування призвело до значних досягнень, включаючи підвищену стійкість до інфекційного панкреатичного некрозу (IPN) і бактеріальної хвороби холодної води у лосося, а також націлювання на ген JAM-A у білого товстолобика для блокування проникнення вірусу, надаючи, таким чином, імунітет до реовірусу білого товстолобика (GCRV).

У тилapia за допомогою CRISPR–Cas9 редагували гени, пов'язані з імунною відповіддю, покращуючи стійкість до бактеріальних патогенів, таких як *Streptococcus agalactiae* і *Aeromonas hydrophila*. Аналогічно, у сома ця технологія була спрямована на гени, що регулюють імунітет, що призвело до підвищення виживаності після впливу патогенів. Ці досягнення були доповнені методами вставки (knock-in), які впроваджують сторонні гени, покращуючи стійкість до хвороб і одночасно підвищуючи ріст і поживну цінність у таких видах, як тилapia та сом (Zhu та ін., 2024).

3.2.2. Ріст риб і якість м'язової тканини

CRISPR–Cas9 відіграє ключову роль у підвищенні темпів росту та якості м'язової тканини у різних видах аквакультури, включаючи нільську тилapiю, каналного сома, звичайного коропа та райдужну форель. Націлюючись на гени, пов'язані з гормоном росту, такі як міостатин (mstn), який пригнічує ріст м'язів, дослідники досягли значного збільшення маси тіла та розвитку м'язів. Наприклад, каналні соми з інактивованим геном mstn показали 29,7% збільшення маси тіла, тоді як подібні модифікації в оливковому камбалі та червоному зубані збільшили м'язову масу та оптимізували комерційний розмір риби.

Крім підвищення темпів росту, CRISPR–Cas9 дозволяє досліджувати процеси розвитку та моделювати людські хвороби з використанням даніо-реріо, який широко застосовується для генетичних досліджень. Трансгенні методи ще більше просунули рибництво вперед, завдяки надекспресії генів гормону росту у таких видах, як атлантичний лосось, що призвело до швидкого росту та більш високих врожаїв, що допомагає задовольнити глобальний попит на білок. Ці генетичні модифікації в поєднанні з оптимізованим харчуванням і відбором за ознаками покращують текстуру м'яса і загальну ефективність аквакультури (Zhu та ін., 2024).



3.2.3. Побічні ефекти у CRISPR–Cas9

Хоча CRISPR–Cas9 забезпечує безпрецедентну точність, побічні ефекти залишаються проблемою. Ці небажані зміни можуть впливати на нецільові ділянки геному, потенційно спричиняючи негативні наслідки. Останні досягнення, включаючи високоточні варіанти Cas9 (наприклад, SpCas9–HF1, eSpCas9), значно знизили частоту побічних змін. Поліпшений дизайн направляючої РНК (gRNA) та алгоритми, такі як CRISPR–DO, підвищили специфічність. Крім того, нові інструменти, такі як базові редактори та прайм-редактори, дозволяють здійснювати точні модифікації геному без індукції дволанцюгових розривів, тим самим мінімізуючи побічні мутації. Передові системи доставки, такі як наночастинки та вірусні вектори, ще більше підвищують точність застосування редагування генів.

Даніо-реріо та інші види аквакультури, включаючи тилапію та атлантичного лосося, виграли від цих досягнень. Високоточне редагування дозволило дослідникам підвищити темпи росту, стійкість до хвороб та інші ознаки, зберігаючи цілісність геному.

Механізм, що використовується CRISPR–Cas9 для вимикання генів у різних видах риб, наведено на Рисунку 3.5.

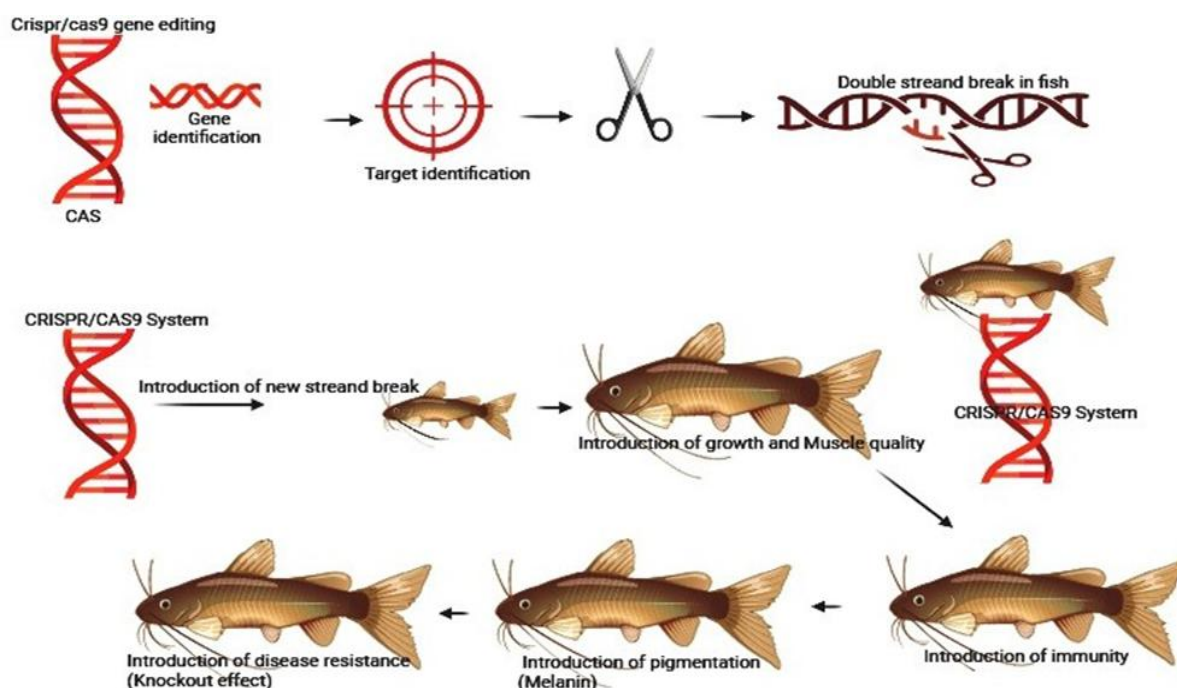


Рисунок 3.5. Етапи застосування CRISPR–Cas9 в аквакультурі (Спочатку розробляється специфічна gRNA для відповідності послідовності цільового гена. Потім білок Cas9 зв'язується з цільовою ДНК, спричиняючи дволанцюговий розрив. Нарешті, цей розрив відновлюється) (Zhu та ін., 2024)

3.2.4. Визначення статі

Визначення статі у риб включає генетичні, екологічні та епігенетичні чинники, що робить його складною, але важливою сферою досліджень в аквакультурі. CRISPR–Cas9 висвітлює механізми статевої диференціації, точно націлюючи відповідні гени. Наприклад, редагування гена *amh* у нільської тилапії призвело до появи фенотипних самок із генетичних самців, що

продемонструвало роль цього гена у визначенні чоловічої статі. Подібні дослідження на даніо-реміо вивчали такі гени, як *dmrt1* і *sox9a*, що показало полігенний характер визначення статі в цього виду. Крім того, загально-геномні скринінги CRISPR–Cas9 ідентифікували головних регуляторів, таких як ген *sdY* у райдужної форелі, що поглибило наше розуміння статевої диференціації.

3.2.5. Ефекти використання CRISPR–Cas9 у редагуванні генів у різних видах риб

CRISPR–Cas9 вирішує такі проблеми, як спалахи хвороб, низькі темпи росту та деградація довкілля в аквакультурі. Його застосування охоплює контроль над інвазійними видами, модифікування мікроорганізмів для екологічної ремедіації та створення генетично модифікованих риб для сталого виробництва. Редагування геному пропонує рішення для покращення ознак риб при одночасному зменшенні екологічного сліду аквакультури. Наприклад, трансгенні риби з поліпшеним коефіцієнтом конверсії корму зменшують використання ресурсів, підтримуючи екологічно дружні практики.

Завдяки можливості точних генетичних модифікацій CRISPR–Cas9 трансформувала аквакультуру, відкриваючи шлях до сталих і ефективних практик рибництва. Подальший розвиток методів редагування, етичні аспекти та управління навколишнім середовищем ще більше оптимізують її застосування в галузі. Таблиця 3.1 подає зведену інформацію про ознаки, які найчастіше є мішенню редагування геному в аквакультурі риб (Blix та ін., 2021).

Таблиця 3.1. Вплив CRISPR–Cas9 на біологічні та екологічні аспекти видів риб

Сфера застосування	Вплив
Стійкість до хвороб	Використовується для зменшення інфікування вірусом вірусної геморагічної септицемії (VHSV) клітин природного ембріона оливкової камбали (HINAE).
	Дозволяє редагування генів у таких видах риб, як лосось, тилапія та креветки, для підвищення їхньої стійкості до хвороб.
	Сприяє видаленню гена JAM-A у клітинах білого товстолобика, що значно підвищує стійкість до інфекції реовірусом білого товстолобика (GCRV).
	Сприяє поліпшенню клітинних ліній риб для відповіді хазяїна та генетичної стійкості до інфекційних хвороб із використанням атлантичного лосося та райдужної форелі як модельних систем в аквакультурі.
Адаптація до навколишнього середовища	Допомагає редагувати гени у таких видах риб, як вирощуваний лосось, для адаптації до змінних умов середовища.
Поліпшені темпи росту і м'язи	Збільшує ріст м'язів шляхом вимикання генів рецепторів меланокортину (<i>mc4r</i>), що було експериментально випробувано на канал'яному сомі та рибі медака.
	Поліпшило темпи росту та збільшило м'язову масу канал'яного сома шляхом модифікації гена міостатину в ембріонах канал'яного сома.
	Сприяє збільшенню м'язової маси товстолобика білого через інактивацію <i>mstn</i> .

Технологія редагування генів CRISPR–Cas9 революціонізувала аквакультуру, надаючи змогу точних генетичних модифікацій для покращення таких ознак, як стійкість до хвороб, ріст і сталість. Цей інструмент також полегшує створення генетичних «приводів» (gene drives), що збільшують частоту успадкування змінених генів майже до 100%, прискорюючи поширення бажаних ознак у популяціях.

Li та ін. (2021) використали CRISPR–Cas9 для створення стерильних, повністю чоловічих популяцій нільської тиліпії, що призвело до більш швидкого росту і зменшення екологічних ризиків від втечі вирощуваних риб. Подібним чином Wargelius та ін. підвищили стійкість до хвороб у атлантичного лосося шляхом модифікації генів, важливих для вірусних інфекцій, вирішуючи значні втрати в аквакультурі, спричинені патогенами, такими як IPNV і SAV.

Інші дослідження використовували CRISPR–Cas9 для підвищення стійкості до хвороб у коропа, тиліпії та сома шляхом редагування генів, пов'язаних з імунною відповіддю або шляхами розпізнавання патогенів. Редагування генів, пов'язаних із ростом, також дало значні результати, наприклад інактивація гена міостатину у звичайного коропа, каналного сома та червоного зубана, що призвело до збільшення розміру тіла та темпів росту.

Застосування CRISPR–Cas9 виходить за межі лише виробничих ознак, даючи змогу створювати нові фенотипи. Приклади включають альбіносів нільської тиліпії та модифікованих тихоокеанських устриць зі збільшеними темпами росту. Гнучкість цієї технології поширюється також на такі види, як креветка ріджетейл, що ще більше демонструє її трансформаційний потенціал в аквакультурі (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.2. Застосування CRISPR–Cas9 у різних видах риб і їхній вплив (Zhu та ін., 2024)

Вид риб	Технологічний вплив
Нільська тиліпія	Використовується для створення стерильних популяцій нільської тиліпії, що зменшує ризик екологічної шкоди від втечі риб.
Атлантичний лосось	Використовується для редагування генів з метою створення видів, стійких до вірусних інфекцій, наприклад, лосося.
Даніо-реріо	Дозволяє досліджувати мутації та генетичні варіанти у даніо-реріо.
	Може бути використаний для успішної інтеграції складних тегів у ембріони даніо-реріо, що забезпечує точне маркування і візуалізацію клітинних структур або білків. Це відкриває перспективи для вивчення динаміки білків, експресії генів та інших біологічних процесів у цьому модельному організмі.
Райдужна форель	Продемонстровано зменшення експресії гена <i>igfbp-2b</i> у райдужної форелі, що впливає на ріст і розвиток. Однак його вплив на загальну продуктивність і ендокринну систему залишається невизначеним.
Атлантичний лосось і райдужна форель	Використовується для націлювання на унікальні гени, пов'язані з ростом та імунітетом, у клітинах атлантичного лосося, райдужної форелі та кохо.
Японська медака	Має потенціал збільшення росту м'язів і маси тіла у вирощуваних видів риб, таких як медака. Однак потрібні додаткові дослідження для визначення його впливу на продуктивність і здоров'я риб.

Оливкова камбала	Може бути використана для інактивації гена міостатину в оливкової камбали, що потенційно збільшує масу тіла та м'язову тканину, але потрібні додаткові дослідження для розуміння його впливу на ефективність виробництва та здоров'я риб.
Канальний сом	Використовується для модифікації гена міостатину в канального сома для поліпшення росту м'язів і якості, але необхідні додаткові дослідження для повного розуміння його впливу.

4. Кріоконсервування та допоміжні репродуктивні технології

4.1. Аквакультура та кріоконсервування

Різноманітні фактори впливають на розведення риб, і навіть найбільш досвідчені оператори риборозплідників часто стикаються з частковими або повними невдачами у процесі розведення. Для досягнення бажаної кількості личинок штучне відтворення широко розглядається як ефективний метод. Цей підхід сприяє дозріванню та нересту риб за несприятливих умов, таких як недостатні опади або екстремальні кліматичні сценарії. Однак повторні спроби розведення можуть значно позначитися на здоров'ї плідників протягом їх обмеженого життєвого циклу. Заміну плідників ускладнюють логістичні та фізіологічні проблеми, пов'язані з їх транспортуванням. Відповідно, транспортування гамет стало перспективною альтернативою, що забезпечує переваги, подібні до тих, які спостерігаються у тваринництві.

Інтеграція біотехнологічних інструментів у програми розведення риб є необхідною для забезпечення стабільного та сталого виробництва личинок. Кріоконсервування пропонує дієве рішення для отримання високоякісних личинок та генетично поліпшених різновидів риб. Усвідомлюючи його потенціал, Продовольча та сільськогосподарська організація (FAO) визначила кріоконсервування як критично важливу стратегію для збереження генетичних ресурсів риб (Betsy та ін., 2022).

Кріоконсервування означає збереження біологічних зразків при надзвичайно низьких температурах, що фактично зупиняє метаболічні процеси та забезпечує структурну і функціональну цілісність цих зразків на невизначений термін. Ця технологія стала наріжним каменем репродуктивної біології, пропонуючи критично важливі переваги для тваринництва та аквакультури. Підтримуючи температуру нижче -130°C , метаболічні процеси повністю припиняються, що дозволяє біологічним зразкам, таким як клітини, тканини та навіть цілі організми, залишатися життєздатними після розморожування. Кріоконсервування має особливе значення для збереження цінного генетичного матеріалу, вдосконалення програм розведення та підтримки зусиль зі збереження біорізноманіття (Fletcher & Rise, 2012).

Механізми збереження

Кріоконсервування дозволяє зберігати гамети протягом тривалого періоду, часто протягом кількох років, без суттєвого впливу на їх здатність до запліднення. Зниження температури приблизно до -196°C повністю зупиняє всі біологічні та біохімічні процеси, запобігаючи процесам, що призводять до загибелі клітин і деградації ДНК. Ця технологія є потужним



інструментом підтримки довгострокової сталості аквакультури та збереження біорізноманіття.

Однак утворення льоду в біологічних системах становить значну проблему, оскільки може призводити до механічних пошкоджень і осмотичного дисбалансу. Керовані процеси охолодження забезпечують утворення льоду поза клітинами, створюючи концентраційний градієнт, що сприяє відтоку води з клітин. Цей процес запобігає утворенню летального внутрішньоклітинного льоду. Прогрес у застосуванні кріопротекторів (CRA) відіграв вирішальну роль у зменшенні цих пошкоджень, забезпечуючи успішне збереження різних типів клітин, тканин і невеликих біологічних структур. Удосконалюючи взаємозв'язок між швидкістю охолодження, концентраціями CRA та специфічними характеристиками клітин, дослідники підвищили ефективність кріоконсервування.

Кріопротектори

Кріопротектори відіграють ключову роль у зменшенні внутрішньоклітинного утворення льоду та збереженні цілісності білків і мембран під час заморожування та відтавання. Ці агенти поділяють на дві категорії: проникні та непроникні. Проникні кріопротектори, такі як ДМСО (диметилсульфоксид), гліцерин і метанол, проникають крізь клітинну мембрану, врівноважуючи внутрішньо- та позаклітинний осмотичний тиск. Непроникні кріопротектори, зокрема цукри та певні білки, діють переважно позаклітинно, змінюючи температуру замерзання розчину і забезпечуючи додатковий захист. Попри їхні переваги, кріопротектори слід застосовувати обережно, оскільки при неправильному використанні вони можуть спричиняти токсичність, осмотичний стрес і хромосомні аномалії. Баланс між захисними властивостями та можливими несприятливими наслідками є важливою сферою сучасних досліджень.

Протоколи заморожування та відтавання

Успіх кріоконсервування значною мірою залежить від точного контролю протоколів заморожування та відтавання. Керовані швидкості охолодження, зазвичай у діапазоні від – 40 °C/хв до повільніших режимів, є необхідними для мінімізації утворення кристалів льоду. Для досягнення таких контрольованих умов широко використовують спеціалізовані біокріостати та методи парів азоту. Водночас процес відтавання має бути швидким, щоб запобігти рекристалізації льоду, що може серйозно пошкодити клітинні структури. Нові технології, включно з програмованими пристроями для заморожування та вдосконаленими методами відтавання, спрямовані на стандартизацію та оптимізацію цих процесів для різних біологічних матеріалів, покращуючи рівень виживання та відновлення функцій (Fletcher & Rise, 2012).

4.1.1. Кріоконсервування гамет

Кріоконсервування сперми

Кріоконсервування сперми є одним із найуспішніших застосувань кріобіології, із добре розробленими протоколами у тваринництві та розширенням застосувань в аквакультурі. Проте сперма риб суттєво відрізняється від сперми ссавців, що потребує унікальних підходів. Основні характеристики сперми риб включають її нерухомість у сім'яній плазмі, активацію



рухливості після контакту з активуючими розчинами, високу чутливість до осмотичних змін і відносно низьке виробництво АТФ. Ці особливості підкреслюють необхідність спеціально розроблених стратегій кріоконсервування для забезпечення життєздатності та функціональності після розморожування.

Розроблення ефективних протоколів кріоконсервування сперми риб передбачає кілька важливих етапів:

- **Збір сперми.** Важливо отримати високоякісну сперму, вільну від домішок. Залежно від виду застосовують такі методи, як абдомінальний масаж, аспірація або пряме вилучення зі статевих залоз. Необхідно уникати контамінації речовинами, наприклад сечею, яка може передчасно активувати рухливість.
- **Аналіз якості.** Оцінювання якості сперми є критичним для відбору зразків, придатних для заморожування. Визначають такі параметри, як рухливість, життєздатність, рН та осмолярність, часто використовуючи сучасні комп'ютеризовані системи для підвищення точності.
- **Приготування екстендера.** Екстендери — це буферні розчини, призначені для запобігання передчасній активації рухливості та створення оптимального середовища для заморожування. Стандартними компонентами є глюкоза, яєчний жовток, антиоксиданти та кріопротектори, такі як ДМСО або гліцерин. Склад екстендера змінюється залежно від виду та специфічних вимог.
- **Заморожування та відтавання.** Сперму зазвичай поміщають у французькі соломинки або кріовіали та заморожують зі встановленою швидкістю, після чого зберігають у рідкому азоті (-196°C). Відтавання проводять швидко у водяній бані для забезпечення максимальної життєздатності. На рисунку 3.6 показано процедури заморожування сперми.





Рисунок 3.6. Процес заморожування сперми: (А) вилучення сперми форелі за допомогою канюляції, (В) розведення в кріопротекторному екстендері, (С) завантаження у французькі соломинки об'ємом 0,5 см³ (вставка з різними типами соломинок, кріовіалами та порошком ПВА для герметизації соломинок), (D) заморожування на плаваючому пристрої у пінопластовому контейнері, що містить рідкий азот (N₂l), (E) зберігання в контейнері з рідким азотом (N₂l), (F) отримання ікри від самки, (G) відтавання сперми у водяній бані та (H–J) запліднення (Fletcher & Rise, 2012)

Кріоконсервування ооцитів

На відміну від сперми, кріоконсервування ооцитів становить значні труднощі. Їх великий розмір, складна структура та обмежена проникність для кріопротекторів роблять їх високочутливими до пошкодження під час заморожування. Проблеми, пов'язані з чутливістю до охолодження, утворенням внутрішньоклітинного льоду та токсичністю кріопротекторів, особливо виражені. Крім того, наявність декількох шарів мембран та високий вміст ліпідів ще більше ускладнюють процес збереження.

Останні дослідження зосереджені на збереженні ооцитів на ранніх стадіях розвитку, коли їхня структурна простота може зменшувати чутливість до пошкоджень під час заморожування. Стратегії включають поетапне видалення кріопротекторів для мінімізації токсичності, дослідження стійкості до охолодження та застосування методів вітрифікації. Вітрифікація, що передбачає ультрашвидке заморожування з використанням високих концентрацій кріопротекторів, є перспективною альтернативою, оскільки усуває утворення кристалів льоду. Проте залишаються проблеми, пов'язані з рівномірним розподілом кріопротекторів та мінімізацією токсичності.

4.1.2. Кріоконсервування ембріонів

Кріоконсервування ембріонів риб, що має на меті збереження як материнського, так і батьківського генетичного матеріалу, має значний потенціал для покращення репродуктивного менеджменту в аквакультурі. Незважаючи на свої перспективи, успішне кріоконсервування ембріонів риб залишається складним завданням через біологічні особливості цих ембріонів, зокрема їх великий розмір, багатокомпартментну структуру та обмежену проникність для кріопротекторів (CPA). Ці фактори, разом із наявністю таких бар'єрів, як синцитіальний шар жовтка (YSL), ускладнюють ефективний розподіл кріопротекторів і води в ембріоні (Рис. 3.7, Nagedorn та ін., 1997).

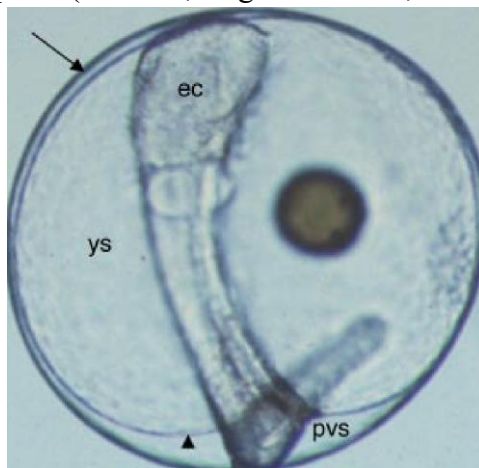




Рисунок 3.7. Ембріон калкана (*turbot*) на стадії хвостового зачатка з показаними різними оболонками та компартментами: хоріон (стрілка), синцитіальний шар жовтка (YSL, вістря стрілки), жовтковий мішок (*ys*), перивітеліновий простір (*pvs*) та ембріональний компартмент (*ec*) (Hagedorn та ін., 1997)

Основною перешкодою є високий вміст води в ембріонах, що може призводити до утворення кристалів льоду та пошкодження клітин під час заморожування і відтавання. Ембріони на ранніх стадіях розвитку, які теоретично мають простішу структуру для збереження, є чутливими до охолодження та токсичності кріопротекторів, що ще більше ускладнює зусилля зі збереження.

Дослідження чутливості ембріонів риб до охолодження показали, що ранні стадії розвитку є більш вразливими до низьких температур, ніж пізніші стадії. Стратегії для зменшення пошкоджень від охолодження включають модифікацію структури ембріона та використання захисних речовин, таких як антифризні білки (AFP). Ці підходи показали потенціал підвищення стійкості до низьких температур, але поки що не дали стабільних результатів.

Використання вітрифікації, техніки, яка усуває утворення кристалів льоду завдяки ультрашвидкому заморожуванню, розглядається як спосіб подолати ці проблеми. Однак вітрифікація потребує високих концентрацій кріопротекторів, які можуть бути токсичними і складно рівномірно розподілятися всередині ембріона через його обмежену проникність. Різні експериментальні підходи, такі як підвищення проникності ембріонів та вдосконалення систем доставки кріопротекторів, досліджуються для подолання цих обмежень.

Останні досягнення включають методи обходу бар'єрів, таких як YSL, та покращення проникнення кріопротекторів. Такі техніки, як мікроін'єкція кріопротекторів або генетичне модифікування для підвищення проникності ембріонів, показали перспективні результати. Крім того, використання природних антифризних білків виявило потенціал у зменшенні утворення кристалів льоду та зниженні пошкоджень, спричинених заморожуванням. Хоча ці методи все ще перебувають на стадії експериментальних досліджень, вони дають цінні знання для майбутнього розвитку кріоконсервування ембріонів.

Подолання проблем кріоконсервування ембріонів риб вимагатиме міждисциплінарної співпраці та технологічних інновацій. Зусилля спрямовані на підвищення рівня кріозахисту на клітинному рівні та вдосконалення методів доставки кріопротекторів. Перспективні напрями включають використання передових лазерних технологій для створення тимчасових пор у ембріонах і розроблення генетично модифікованих ліній із підвищеною стійкістю до пошкоджень, спричинених заморожуванням.

Завдяки безперервним дослідженням кріоконсервування ембріонів риб має потенціал стати надійним інструментом для аквакультури, підтримуючи збереження генетичних ресурсів та сприяючи впровадженню сталих практик у рибництві.

Кріоконсервувальні технології розроблені для багатьох видів риб (Betsy та ін., 2022):

- Ця технологія може використовуватися для збереження молочок найкращих за віком плідників, які можна застосовувати будь-коли у майбутньому.
- Вона може усунути проблему інбридингу, оскільки кріоконсервовані сперматозоїди можна легко обмінювати між рибозплідниками.



- Завдяки цій технології сперматозоїди можуть бути доступними у будь-яку пору року.
- Вона робить можливим відтворення поза сезоном.
- Вона синхронізує наявність гамет обох статей, що сприяє економії сперми.
- Вона спрощує управління плідниками на фермах.
- Вона допомагає у виробництві життєздатного та сильного потомства шляхом внутрішньовидової гібридизації.
- Вона долає труднощі, пов'язані з короткочасною життєздатністю гамет.
- Вона дає змогу зберігати бажані лінії на генетичному рівні.
- Вона дозволяє проводити міжвидову гібридизацію у різні пори року.
- Вона сприяє збереженню генофонду для програм генетичного відбору або охорони видів.
- Кріоконсервовані сперматозоїди можуть використовуватися у програмах гібридизації та дослідженнях із генетичної інженерії риб.
- Вона відкриває багато інших можливостей, зокрема створення кріобанків життєздатних гамет, як це відбувається у тваринництві, та розвиток генно-банківських технологій і генетичних маніпуляцій у рибництві.

Кріоконсервування є трансформаційним інструментом у біотехнології аквакультури, що пропонує значні переваги для збереження генетики, програм розведення та охорони біорізноманіття. Хоча проблеми залишаються, особливо у сфері кріоконсервування ембріонів та ооцитів, постійний прогрес у методах кріозахисту, генетичних технологіях та міждисциплінарних дослідженнях відкриває перспективи подолання цих бар'єрів. Майбутні розробки, ймовірно, розширять масштаби й ефективність кріоконсервування, забезпечивши його ширше застосування в аквакультурі та за її межами. Завдяки постійному впровадженню інновацій кріоконсервування готове відігравати ключову роль у підтримці сталого зростання аквакультури та збереженні водного біорізноманіття (Fletcher & Rise, 2012).

5. Етичні, екологічні та регуляторні аспекти

5.1. Етичні питання в біотехнології аквакультури

Благополуччя тварин при генетичних модифікаціях

Етичні наслідки генетичної модифікації в аквакультурі є значними, особливо щодо благополуччя тварин. Генетичні втручання, такі як трансгенез і редагування генів, часто спрямовані на поліпшення виробничих характеристик, зокрема швидкості росту, стійкості до захворювань та толерантності до умов довкілля. Однак такі модифікації можуть ненавмисно спричинити фізіологічний стрес або проблеми зі здоров'ям. Наприклад, прискорений ріст у трансгенних риб може призводити до деформацій скелета, зниження імунної функції або змін швидкості метаболізму. Критики стверджують, що пріоритет продуктивності над благополуччям може поставити під загрозу гуманне ставлення до цих організмів, порушуючи питання про баланс між інноваціями та гуманними практиками.

Замкнутий характер систем аквакультури ще більше посилює ці занепокоєння. Риби, вирощувані в таких умовах, часто утримуються при високій щільності посадки, що призводить



до стресу, підвищеної сприйнятливості до захворювань і змін у поведінці. Етичні міркування також охоплюють питання, чи є генетично модифіковані риби більш або менш пристосованими до виживання в таких умовах порівняно з їхніми дикими аналогами. Розроблення показників благополуччя, спеціально адаптованих для генетично змінених водних видів, є необхідним, щоб забезпечити, що їхня якість життя не буде невинувато погіршена.

Екологічна цілісність і біорізноманіття

Окрім благополуччя окремих особин, етичні питання охоплюють ширші екологічні наслідки біотехнологічних втручань. Впровадження генетично модифікованих або селективно виведених видів у системи аквакультури чи природні середовища несе ризики для екологічної цілісності. Наприклад, трансгенні риби з підвищеною швидкістю росту можуть конкурувати з місцевими видами за ресурси, порушуючи локальні екосистеми та потенційно призводячи до зниження чисельності або навіть зникнення диких популяцій. Ці занепокоєння підкреслюють моральну відповідальність за забезпечення того, щоб застосування біотехнологій не підривало біорізноманіття та стійкість водних екосистем.

Етична дискусія також торкається питань людського управління біорізноманіттям. Хоча біотехнології можуть допомагати у зусиллях із збереження, наприклад, шляхом кріоконсервування генетичного матеріалу зникаючих видів, вони також порушують питання про право людства змінювати генетичні коди з економічною або екологічною метою. Досягнення балансу між використанням біотехнологій для позитивних результатів та збереженням природних еволюційних процесів водних видів залишається ключовим етичним викликом.

5.2. Регуляторні рамки

Глобальні стандарти та настанови

Управління біотехнологічними застосуваннями в аквакультурі є складною та динамічною сферою. Міжнародні організації, такі як Продовольча та сільськогосподарська організація (FAO) та Конвенція про біологічне різноманіття (CBD), розробили рамкові підходи для безпечного й етичного використання біотехнологій. Ці настанови підкреслюють принцип обережності, вимагаючи ретельних оцінок ризиків і моніторингу перед затвердженням і випуском генетично модифікованих організмів (ГМО) у системи аквакультури.

Одним із ключових аспектів глобальних стандартів є гармонізація регуляторних вимог у різних країнах для забезпечення узгодженості заходів безпеки та охорони довкілля. Це особливо важливо, враховуючи транскордонний характер водних екосистем і потенційну можливість втечі організмів, що може вплинути на водойми сусідніх держав. Співпраця між країнами через договори та угоди відіграє вирішальну роль у встановленні єдиних практик і зниженні ризиків.

Національні регуляторні підходи

На національному рівні регуляторні рамки суттєво відрізняються, що відображає різні пріоритети, технологічні можливості та суспільне ставлення до біотехнологій. Деякі країни,



такі як США та Канада, мають розвинені системи для оцінки безпеки та ефективності генетично модифікованих організмів, включно з ретельними процесами експертизи, які охоплюють наукові, екологічні та медико-санітарні оцінки. Натомість інші регіони можуть не мати комплексних регуляторних структур, що призводить до прогалин у нагляді та потенційних ризиків.

Регуляторні підходи часто передбачають багатоступеневі процеси, починаючи з лабораторних випробувань і переходячи до контрольованих польових тестувань перед повномасштабним впровадженням. Ці процеси спрямовані на оцінку екологічних, економічних та соціальних наслідків нових біотехнологій. Все більшого значення набувають громадські консультації та прозорість як критично важливі елементи регуляторних рамок, що сприяють довірі та забезпечують ухвалення рішень, які відображають суспільні цінності.

Оцінки безпеки та процеси схвалення

Оцінки безпеки є центральним елементом регуляторних рамок, забезпечуючи наукову основу для оцінки потенційних ризиків застосування біотехнологій. Такі оцінки зазвичай охоплюють кілька ключових аспектів:

- **Екологічні ризики.** Оцінювання ймовірності втечі та потенційних екологічних наслідків від ГМО, включно з конкуренцією з місцевими видами, гібридизацією та змінами середовища існування.
- **Ризики для здоров'я людини.** Переконавання, що генетично модифіковані риби, призначені для споживання, не містять алергенів, токсинів або непередбачуваних генетичних ефектів, які можуть зашкодити споживачам.
- **Моніторинг екосистеми.** Впровадження програм моніторингу після затвердження для виявлення та усунення непередбачуваних впливів, забезпечуючи довгострокову сталість.

Процеси схвалення зазвичай передбачають координацію між кількома відомствами, включно з екологічними, сільськогосподарськими та органами охорони здоров'я. Суворі наукові оцінки разом із громадським обговоренням спрямовані на досягнення балансу між інноваціями, безпекою та етичними аспектами.

5.3. Екологічні наслідки біотехнологій в аквакультурі

5.3.1. Управління ризиками

Одним із найзначніших екологічних ризиків біотехнологій в аквакультурі є генетичне забруднення, коли гени від генетично модифікованих або селективно виведених видів передаються диким популяціям. Це може відбуватися через схрещування, що призводить до генетичної гомогенізації та втрати локально адаптованих ознак у диких видів. Довгострокові наслідки такого генетичного інтрогресу включають зниження стійкості до змін навколишнього середовища та скорочення біорізноманіття.

Вплив відбору, пов'язаного з доместикацією, на генетичні та фенотипові характеристики тварин аквакультури може призводити до різних потенційних екологічних наслідків у разі їх випуску у дику природу. На рисунку 3.8 узагальнено механізми, відповідальні за такі наслідки,



у межах чотирьох категорій: прямі екологічні ефекти, непрямі екологічні ефекти, прямі генетичні ефекти та непрямі генетичні ефекти.

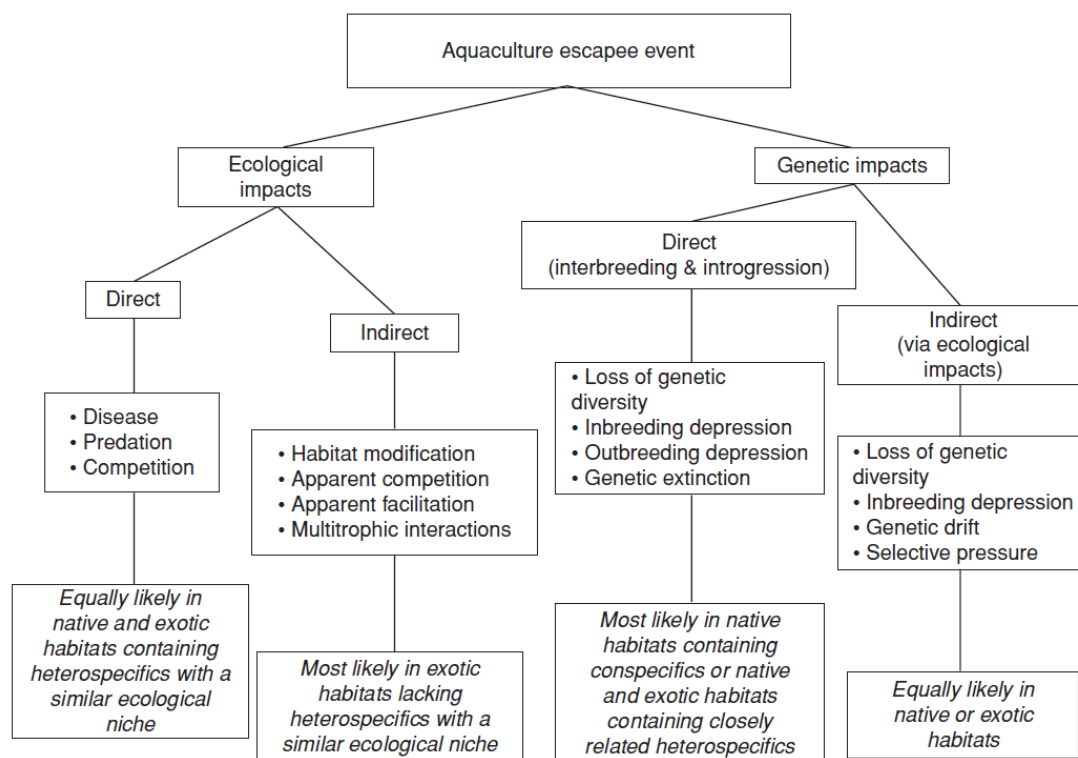


Рисунок 3.8. Можливі екологічні наслідки втечі риби з аквакультурних систем

Системи аквакультури особливо вразливі до випадків втечі, коли вирощувана риба потрапляє у природні екосистеми. Такі втечі можуть призводити до конкуренції з дикими популяціями за ресурси, поширення хвороб і порушення динаміки трофічних ланцюгів. Зменшення цих ризиків потребує надійних стратегій стримування, таких як фізичні бар'єри, а також розроблення стерильних генетично модифікованих риб, що не здатні розмножуватися у дикій природі.

Взаємодія з дикими популяціями

Взаємодія між вирощуваними та дикими популяціями виходить за межі генетичних наслідків. Трансгенні риби з покращеними ознаками, такими як швидший ріст або вища стійкість до захворювань, можуть мати екологічні переваги перед своїми дикими аналогами. Ці переваги здатні спричиняти зміни у співвідношенні хижак-жертва, зміну динаміки конкуренції та зміну використання середовищ існування.

Дослідження поведінки та екологічних ролей генетично модифікованих риб є необхідними для прогнозування та управління цими взаємодіями. Довгострокові екологічні дослідження в поєднанні з прогнозним моделюванням можуть допомогти виявити потенційні ризики та визначити напрями управлінських практик.



Довгострокова сталість

Забезпечення довгострокової сталості біотехнологій в аквакультурі потребує комплексного підходу, що враховує екологічні, економічні та соціальні аспекти. Це включає мінімізацію руйнування середовищ існування, оптимізацію використання ресурсів і захист диких популяцій. Досягнення у сфері біотехнологій, такі як розроблення екологічно безпечних кормів та вдосконалення систем управління відходами, можуть сприяти більш сталим практикам у аквакультурі.

Моніторинг та адаптивне управління є критично важливими компонентами сталої аквакультури. Постійне оцінювання екологічних наслідків біотехнологічних втручань і коригування практик відповідно до результатів дає змогу зацікавленим сторонам поєднувати продуктивність із екологічною відповідальністю.

5.3.2. Баланс між прогресом і відповідальністю

Інтеграція біотехнологій в аквакультуру відкриває великі можливості для вирішення глобальних проблем, зокрема продовольчої безпеки та збереження біорізноманіття. Проте цей прогрес повинен супроводжуватися сильною відданістю етичним принципам, суворим регуляторним наглядом і проактивним екологічним управлінням. Завдяки співпраці вчених, політиків, представників промисловості та громадськості аквакультура може розвиватися одночасно інноваційно та сталим шляхом.

Етичні, екологічні та регуляторні аспекти є не просто перешкодами, які слід подолати, а невід'ємними складовими відповідального розвитку біотехнологій аквакультури. Завдяки ретельному плануванню, прозорому ухваленню рішень та постійному дослідженню сектор може реалізувати свій потенціал, водночас забезпечуючи добробут водних екосистем і спільнот, які від них залежать (Fletcher & Rise, 2012).

Підсумок

Глобальне потепління суттєво порушило цикли розмноження, темпи росту та виживаність водних видів. Підвищення температури води змінює час нересту та швидкість метаболізму, що призводить до невідповідності у доступності кормової бази та неідеальних умов для розвитку личинок. Такі види, як атлантична тріска та європейський окунь, розмножуються раніше, що знижує рівень виживаності їхнього потомства. Крім того, підвищені температури можуть зменшувати рівень кисню у воді, що спричиняє стрес у личинок і впливає на розвиток молоді. Хоча деякі види демонструють генетичні адаптації для подолання цих змін, швидкі зміни довкілля часто перевищують здатність популяцій адаптуватися, що призводить до довгострокового зниження чисельності.

Аквакультура використовує біотехнології, щоб пом'якшити ці виклики та підвищити стійкість вирощуваних видів. Програми селекційного розведення зосереджені на таких ознаках, як теплостійкість, стійкість до захворювань і ефективність росту. Геномна селекція прискорює цей процес, використовуючи генетичні маркери для відбору бажаних ознак. Наприклад, атлантичний лосось виведений для стійкості до вищих температур і гіпоксичних умов.



Водночас геномні інструменти використовувалися для створення стійких до захворювань ліній райдужної форелі та інших видів.

Технологія CRISPR–Cas9 стала революційним інструментом в аквакультурі, дозволяючи здійснювати точні та цільові зміни у геномах риб. Цей метод дає змогу покращувати ключові ознаки, включно з темпами росту, якістю м'язової тканини, стійкістю до захворювань та адаптацією до довкілля. Наприклад, генетичні модифікації у таких видах, як тіляпія Нільська та сом каналний, забезпечили швидші темпи росту та покращений розвиток м'язів шляхом редагування гена міостатину (*mstn*). Аналогічно CRISPR–Cas9 використовували для підвищення стійкості до хвороб у атлантичного лосося та товстолибика, редагуючи імунні гени та шляхи розпізнавання патогенів.

Окрім покращення окремих ознак, CRISPR застосовується у визначенні статі та управлінні популяціями. Такі технології, як створення стерильних популяцій, зменшують екологічні ризики, пов'язані з втечею риби з аквакультурних господарств. Незважаючи на ці досягнення, технологія має певні виклики. Побічні ефекти редагування геному та етичні проблеми, пов'язані з благополуччям тварин і екологічними ризиками, вимагають суворого регуляторного контролю та подальших досліджень.

Кріоконсервування є ще однією ключовою технологією, що пропонує рішення для збереження генетичних ресурсів і підвищення ефективності розведення. Завдяки збереженню гамет і ембріонів при наднизьких температурах ця технологія підтримує збереження біорізноманіття та програми розведення протягом різних сезонів і в різних географічних регіонах. Проте труднощі, пов'язані з чутливістю до охолодження та токсичністю кріопротекторів, особливо в ооцитах і ембріонах, підкреслюють потребу у безперервних дослідженнях для оптимізації протоколів і підвищення успішності процедур.

Інтеграція біотехнологій в аквакультуру піднімає глибокі етичні та екологічні питання. Потенційне потрапляння генетично модифікованих організмів (ГМО) у природні екосистеми та їх схрещування з дикими популяціями несе ризики для генетичної цілісності та біорізноманіття. Регуляторні рамки як на національному, так і на міжнародному рівнях відіграють важливу роль у вирішенні цих питань, приділяючи увагу оцінкам ризику, моніторингу та залученню громадськості. Етичні міркування охоплюють також благополуччя тварин, особливо щодо того, щоб біотехнологічні втручання не погіршували здоров'я та добробут вирощуваних видів.

Майбутнє аквакультури залежить від досягнення балансу між технологічним прогресом і сталістю. Такі інновації, як CRISPR–Cas9 та геномна селекція, мають величезний потенціал для підвищення стійкості та продуктивності. Однак міждисциплінарна співпраця, надійне управління та дбайливе ставлення до довкілля є ключовими для мінімізації екологічних наслідків і забезпечення довгострокової життєздатності. Пріоритизація етичних практик і сталості дає змогу аквакультурі відігравати важливу роль у вирішенні глобальних проблем продовольчої безпеки та збереженні водного біорізноманіття.

Цей розділ підкреслює важливість вирішення взаємопов'язаних проблем зміни клімату та сталого розвитку аквакультури за допомогою інноваційних і відповідальних біотехнологічних

рішень. Використовуючи потенціал цих досягнень, галузь аквакультури може зробити внесок у глобальні зусилля зі збереження біорізноманіття, підвищення кліматичної стійкості та продовольчої безпеки.

Список використаних джерел

- Angilletta, M. J., Steury, T. D., & Sears, M. W. (2004). Temperature, growth rate, and body size in ectotherms: Fitting pieces of a life-history puzzle. *Integrative and Comparative Biology*, 44(6), 498–509. <https://doi.org/10.1093/icb/44.6.498>
- Betsy, C. J., C. S., & Sampath Kumar, J. S. (2022). Cryopreservation and its application in aquaculture. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99629>
- Blix, T. B., Dalmo, R. A., Wargelius, A., & Myhr, A. I. (2021). Genome editing on finfish: Current status and implications for sustainability. *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2344–2363. <https://doi.org/10.1111/raq.12571>
- Chevin, L. M., Lande, R., & Mace, G. M. (2010). Adaptation to climate change: Combining plasticity and evolution in a changing world. *Ecology Letters*, 13(11), 1318–1333. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01552.x>
- Durant, J. M., Hjermann, D. Ø., Ottersen, G., & Stenseth, N. C. (2007). Trophic match–mismatch and climate change: Linking phenologies in predator and prey. *Ecology*, 88(8), 2405–2412. <https://doi.org/10.1890/06-2089.1>
- Fischer, J. R., Brommer, J. E., Helm, B., & Visser, M. E. (2014). Evolutionary responses of aquatic species to climate change. *Nature Climate Change*, 4, 42–51. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Fletcher, G. L., & Rise, M. L. (Eds.). (2012). *Aquaculture biotechnology*. Wiley-Blackwell.
- Gjøen, H. M., Refstie, T., Sahara, E., Ruane, N. M., L'Abe-Lund, T. M., & Fjelldal, P. G. (2018). Aquaculture breeding programs for climate resilience. *Aquaculture Reports*, 12, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2018.02.003>
- Hagedorn, M., Hsu, E., Kleinhans, F. W., & Wildt, D. E. (1997). New approaches for studying the permeability of fish embryos: Toward successful cryopreservation. *Cryobiology*, 34(4), 335–347. <https://doi.org/10.1006/cryo.1997.2030>
- Heath, M. R., Speirs, D. C., & Steele, J. H. (2014). Climate change and fish growth. *Fish and Fisheries*, 15(3), 319–329. <https://doi.org/10.1111/faf.12025>
- Houston, R. D., Bishop, S. C., Hamilton, A., Guy, D. R., Tinch, A. E., Taggart, J. B., McAndrew, B. J. (2018). Selective breeding for disease resistance in aquaculture species: Challenges and progress. *Fisheries Research*, 200, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.09.020>
- Huntingford, F. A., Turnbull, J. F., Kadri, S., Bergeron, R., Klinger, E., Ruthin, M. L. (2020). The potential of selective breeding for climate resilience in aquaculture species. *Aquaculture*, 525, 735303. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735303>
- Yang, Z., Yu, Y., Tay, Y. X., & Yue, G. H. (2022). Genome editing and its applications in genetic improvement in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 178–191. <https://doi.org/10.1111/raq.12591>
- Jørgensen, C., Ernande, B., Fiksen, Ø., & Dieckmann, U. (2017). Local adaptation of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to thermal variation. *Journal of Evolutionary Biology*, 30(11), 2435–2446. <https://doi.org/10.1111/jeb.13199>
- Li, M., Dai, S., Liu, X., Xiao, H., & Wang, D. (2021). A detailed procedure for CRISPR/Cas9-mediated gene editing in tilapia. *Hydrobiologia*, 848, 3865–3881. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04524-5>
- Lynch, M., & Lande, R. (1993). Evolution and extinction in changing environments. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(7), 142–144. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90245-Y](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90245-Y)

- Liu, Y., et al. (2020). Genomic selection for heat tolerance in rainbow trout: A practical approach. *Journal of Fish Biology*.
- O'Reilly, C. M., Alin, S. R., Plisnier, P.-D., Cohen, A. S., & McKee, B. A. (2008). Impacts of climate change on fish populations. *Science*, 319(5865), 183–186. <https://doi.org/10.1126/science.1149477>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637–669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Pörtner, H. O., Langenbuch, M., & Reipschläger, A. (2004). Biological impact of elevated CO₂ in aquatic ecosystems: Lessons from animal physiology and Earth history. *Journal of Oceanography*, 60(4), 705–718. <https://doi.org/10.1007/s10872-004-5763-6>
- Tompkins, E. M., White, E. C. & Reeves, A. R. (2017). Effects of warming on fish breeding patterns. *Global Change Biology*, 23(9), 3365–3375. <https://doi.org/10.1111/gcb.13643>
- Vázquez, R., Ponzoni, R. W., Nguyen, N. H., & Houston, R. D. (2018). Genomic selection in aquaculture for disease resistance. *Aquaculture International*, 26(1), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0192-7>
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Wargelius, A., Leininger, S., Skaftnesmo, K. O., Kleppe, L., Andersson, E., Taranger, G. L., Schulz, R. W., & Edvardsen, R. B. (2016). Dnd knockout ablates germ cells and demonstrates germ cell independent sex differentiation in Atlantic salmon. *Scientific Reports*, 6, 21284. <https://doi.org/10.1038/srep21284>
- Zhu, M., Sumana, S. L., Abdullateef, M. M., Falayi, O. C., Shui, Y., Zhang, C., Zhu, J., & Su, S. (2024). CRISPR/Cas9 technology for enhancing desirable traits of fish species in aquaculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9299. <https://doi.org/10.3390/ijms25179299>



Розділ 4. Зміни в кормах та методах годування в аквакультурі через глобальне потепління

Професор, д-р Ергюн Демір
Доцент, д-р Мухітгін Зенгін
Університет Баликесір

Вступ

Аквакультура є одним із найшвидше зростаючих секторів сільського господарства у світі і набуває все більшого значення для виробництва стійких і здорових продуктів харчування з відносно низьким впливом на клімат. За прогнозами, до 2030 року рибництво зросте на 32% (ФАО, 2020). Ринкові сили сходяться на думці, що стимулювання зростання європейської аквакультури є найреальнішим способом задовольнити зростаючий попит на рибну продукцію. Однак досягти сталого виробництва, яке сприяє здоровому харчуванню, відповідає цілям сталого розвитку та спрямовано на досягнення нульового рівня викидів (Messeder, 2021), є складним завданням. За умов зміни клімату, за оцінками, доступність поживних речовин зменшиться (Cheung et al., 2023). Дефіцит високоякісних кормів та кормових інгредієнтів, а також занепокоєння щодо безпеки та якості водних продуктів становлять значні виклики для сталого розвитку цього сектору (Ma & Hu, 2023).

Рибне господарство щорічно генерує приблизно 250 мільйонів тонн еквіваленту CO₂ у всьому світі (MacLeod et al., 2020). Вирощування лосося щорічно генерує приблизно 10 мільйонів тонн еквіваленту CO₂. Корми становлять в середньому 75% викидів парникових газів (ПГ), пов'язаних з виробництвом лосося в Норвегії (Ziv-Douki, 2020). У порівнянні з виробництвом тваринницької продукції, особливо яловичини, виробництво морепродуктів має нижчі викиди вуглецю.

Зміни температури призводять до поганого росту та виживання видів, що мешкають у холодній воді, погіршення якості води, ослаблення імунної системи видів, що мешкають у холодній воді, ослаблення здатності океану поглинати вуглець та підвищення вірулентності аквакультурного господарства, слід прагнути до значного скорочення викидів у процесі патогенів у теплішій воді. Оскільки корми значно впливають на вуглецевий слід виробництва кормів (Zhang et al., 2024).

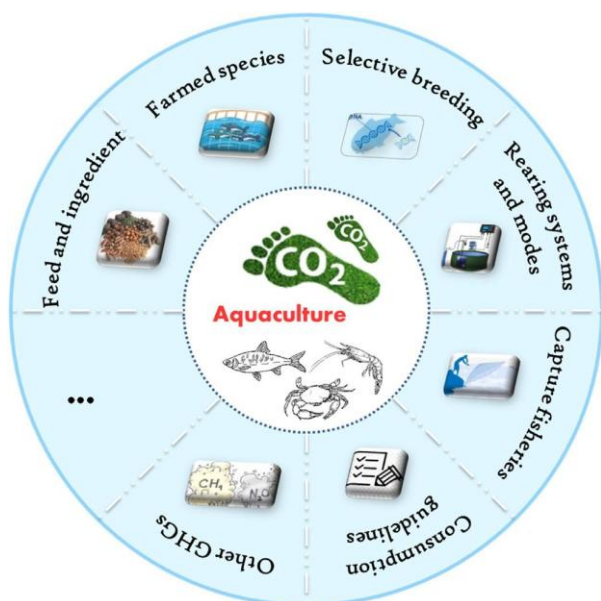


Рисунок 4.1. Сектори втручання для скорочення викидів вуглецю в аквакультури (за матеріалами Zhang et al., 2024).

1. Зміни у фізіології харчування

1.1. Температура і метаболізм

Аквакультура є більш чутливою до впливу кліматичних змін через свою значну залежність від навколишнього середовища. Глобальне потепління призводить до підвищення температури води, що може збільшити швидкість метаболізму видів, які вирощуються в аквакультури, і вимагає зміни складу кормів для задоволення підвищених потреб у поживних речовинах (Reid et al., 2019). Базові енергетичні потреби риб, які є пойкилотермними тваринами, безпосередньо залежать від температури води. З підвищенням температури збільшується їх стандартний метаболізм, а отже, і потреби в енергії та білках для підтримання життєдіяльності. Крім того, ступінь впливу температур в оптимальному діапазоні на базовий метаболізм варіюється залежно від виду. Зміна клімату є одним з найважливіших факторів стресу в аквакультури.

1.2. Травлення та засвоєння поживних речовин

Зміни швидкості метаболізму, спричинені температурою, впливають не тільки на енергетичну цінність раціону, але й на коефіцієнт ефективності корму (FER, приріст/корм) або коефіцієнт конверсії корму (FCR, корм/приріст). Різниця в температурі води в кілька градусів може спричинити значні відмінності в коефіцієнті конверсії корму у деяких видів (Siikavuorio et al., 2012). Зміни FCR, спричинені коливаннями температури води, також можуть призвести до змін у засвоюваності певних категорій поживних речовин, таких як жирні кислоти у лососевих (Huguet et al., 2015). З іншого боку, можна сказати, що вплив температури води на засвоюваність поживних речовин у водних тварин загалом є мінімальним. У цьому контексті дослідження, проведені на лососі, показали, що засвоюваність білків і ліпідів може дещо змінюватися залежно від температури (Amin et al., 2014). Деякі дослідження показують, що «час проходження корму через кишечник» може залежати від температури води, залежно від виду. Дослідження підкреслюють, що висока температура води матиме мінімальний вплив на



перетравність поживних речовин або енергії водних тварин, поки не буде перевищено оптимальний діапазон (Reid et al., 2019).

Споживання корму та швидкість метаболізму

Глобальне потепління та пов'язані з ним кліматичні зміни призводять до потепління та підкислення водойм, а також до змін у режимі опадів та вітрів, що, в свою чергу, впливає на течії, турбулентність та каламутність води. Ці зміни впливають на систему харчування та ендокринну систему водних тварин (Nadermann et al., 2019). Зміни клімату та зміни у водному середовищі, спричинені викидами вуглекислого газу (CO₂) та метану в атмосферу, також можуть впливати на фізіологію та поведінку риб, а також на харчування та ендокринний контроль харчування (Ahmed et al., 2019; Volkoff, 2019).

Риби, будучи ектотермними істотами, чутливі до змін температури води. Підвищення температури води призводить до збільшення споживання кисню та швидкості метаболізму, що спричиняє підвищення енергетичних потреб (Sandblom et al., 2014). Хоча ці зміни варіюються залежно від виду, споживання корму рибами збільшується при помірному підвищенні температури (Sharma et al., 2017). Дослідження показують, що підвищення рівня CO₂ та низький рівень pH води зменшують споживання корму рибами, порушуючи їхню здатність сприймати хімічні сигнали та виявляти корм, впливаючи на їхній нюх (Porteus et al., 2018). Оскільки риbam потрібно більше рухати м'язами, щоб утримувати рівновагу в бурхливих водах, вони також збільшують свої енерговитрати. Крім того, умови низької видимості негативно впливають на годування риб.

Вплив зміни клімату на мікрофлору або мікробіоту риб

Морфологія травної системи риб має прямий вплив на травну здатність та імунний статус риб. Однак вони також вразливі до теплового стресу, який впливає на їхнє здоров'я (Geda et al., 2012). Відомо, що тепловий стрес може мати несприятливий вплив на ворсинки та зону всмоктування в травній системі різних видів тварин, таких як свині та кури. Однак вплив теплового стресу на морфологію кишечника риб до кінця не вивчений. Мікробіота кишечника, як правило, взаємодіє з кишечником хазяїна складним чином і бере участь майже у всіх фізіологічних процесах, включаючи метаболізм та імунітет (Gardiner et al., 2020; Yadav & Jha, 2019), і чутлива до змін температури. Було показано, що підвищення температури води спричиняє зменшення кількості корисних молочнокислих бактерій та збільшення кількості потенційно небезпечних бактерій *Vibrio* spp. в атлантичному лососі (*Salmo salar*) (Amin et al., 2016). Однак вплив теплового стресу на мікробіоту кишечника, здається, залежить від виду.

Мікробіом широко визнаний важливим компонентом у підтримці загального здоров'я риб, що підтверджується численними дослідженнями (Legrand et al., 2020). Температура є важливим небіологічним фактором, що впливає на фізіологічний стан тварин; це особливо актуально для водних організмів, у яких температура тіла коливається у відповідь на температуру води (Sepulveda & Moeller, 2020). Стрес може порушити структуру кишкової мікрофлори, тим самим впливаючи на фізіологічну та імунну системи риб (Blacher et al., 2017). Окрім зміни структури кишкової мікробіоти, температура також може впливати на метаболізм хазяїна та



призводити до змін фенотипу (Guillen et al., 2019). Trinh et al. (2017) виявили значні відмінності в мікробіоті кишечника молодих риб з різними темпами росту. Вони припустили, що мікробіота може впливати на темпи росту молодих риб, посилюючи енергетичний обмін. Rimoldi et al. (2020) показали, що домінуюча мікробіота кишечника може бути використана для оцінки стану здоров'я європейського морського окуня.

2. Екологічно стійкі кормові інгредієнти в аквакультури

Аквакультура може виробляти тваринний білок з меншими викидами парникових газів, ніж наземне тваринництво (Hilborn et al., 2018). Тому аквакультура є більш кліматично сприятливим сектором виробництва білка, ніж інші сектори тваринництва (NOAA Fisheries, 2022). Корми для аквакультури використовують понад 70% світового обсягу рибного борошна та риб'ячого жиру (FMFO). Щорічно в океані виловлюється приблизно 30 мільйонів тонн дрібної риби, з яких близько 17 мільйонів тонн використовується в кормах для аквакультури (Cottrell et al., 2020). Таким чином, використання альтернативних джерел білка для кормів для аквакультури може зменшити вплив аквакультури на навколишнє середовище, потенційно забезпечити виробництво більш економічно ефективних кормів та сприяти розвитку конкурентоспроможного сектору. Альтернативні джерела білка, такі як борошно з комах, не є новими, але останні інвестиції в цей сектор наближають їх до готовності до виходу на ринок. Хорошим прикладом цього є нові ініціативи, започатковані з метою допомогти виробникам лосося зменшити свій вплив на навколишнє середовище на 30% до 2030 року. Інші джерела кормів, зокрема морські водорості/водорості, слід розвивати далі. Дослідження кормів на основі промислової біотехнології є ще однією новою галуззю. Екструзія підвищує засвоюваність і всмоктування поживних речовин у кормах (Zhang et al., 2024).

2.1. Альтернативні джерела корму/білка

В ЄС очікується, що до 2050 року виробництво білка подвоїться. Однак, оскільки ЄС не є самодостатнім у виробництві білка, близько 70% кормових білків імпортується. Тому ЄС потрібно знайти стійкі альтернативні джерела білка, які можна економічно виробляти в кількостях, достатніх для задоволення зростаючого попиту харчової та кормової промисловості (Smáráson, 2023). Сталість кормових ресурсів для аквакультури в першу чергу залежить від наявності високоякісних кормових інгредієнтів, таких як FMFO. Ці традиційні кормові інгредієнти зазнають все більшого тиску через швидке розширення аквакультури для споживання людиною, зменшення вилову риби та зміну клімату (Idenyi et al., 2022).

Понад 90% парникових газів в аквакультури утворюються внаслідок використання кормів для риб. Підхід циркулярної економіки може бути застосований у виробництві кормів для рибних господарств з використанням нових біоматеріалів, що допоможе досягти цілей у сфері зміни клімату (Tait, 2021). Сьогодні приблизно 70% загального обсягу світового виробництва аквакультури за вагою залежить від постачання зовнішніх кормових ресурсів. Ця ситуація є одним з найбільших викликів для майбутньої стійкості аквакультури, що вимагає розробки альтернативних інгредієнтів для кормів (Reid et al., 2019).



Обмежений і зменшуваний глобальний вилов риби призводить до зниження світового виробництва рибного борошна (приблизно 5 мільйонів тонн на рік) і риб'ячого жиру (приблизно 1 мільйон тонн на рік). Оскільки 60-80% цього рибного борошна і приблизно 70-80% риб'ячого жиру використовуються в аквакультурі (FAO, 2022). З огляду на зростаючий попит на FMFO в результаті постійно зростаючої галузі аквакультури, для підтримки стійкої аквакультури необхідно знайти відповідні замітники FMFO.

Рибне борошно та риб'ячий жир (FMFO) як основні інгредієнти кормів для аквакультури

Аквакультура — це виробнича лінія, що використовує «годовані» види, такі як креветки, морський окунь і лосось, та «негодовані» види, такі як срібний короп, водорості та устриці. Традиційно годувана аквакультура покладалася на аквакорми, що містять високий рівень FMFO (Froehlich et al., 2018). Однак використання FMFO вважається провідним фактором нестабільності в аквакультурі, оскільки воно збільшує тиск на рибні запаси та порушує баланс водних харчових ланцюгів (Hua et al., 2019). Залежність аквакультури від кормів на основі риби становить загрозу для морського біорізноманіття та продовольчої безпеки. Як відомо, зміна клімату та Ель-Ніньо шкодять багатьом природним водним джерелам їжі, зокрема фітопланктону. З цих причин кількість FMFO, що використовується у водних кормах, з роками зменшується. Іншою проблемою, спричиненою рибним борошном, є збільшення накопичення важких металів, хімікатів та мікропластику в морській рибі (Hanachi et al., 2019).

Рослинні корми/олії та екологічні виклики

В останні роки виробники кормів для аквакультури переходять на сільськогосподарські продукти, такі як соя, кукурудза та канола, замість FMFO. Використання трансгенних насіння, води, пестицидів та добрив у виробництві цих продуктів має негативний вплив на екологічну стійкість. Тому заміна інгредієнтів FMFO на інгредієнти наземних продуктів, здається, далека від досягнення мети нульового вуглецевого сліду. Вони також мають низьку поживну цінність, погану засвоюваність і дефіцит незамінних амінокислот, таких як лізин, треонін і триптофан. З цієї причини все ще неможливо замінити рибне борошно рослинним білком. Оскільки продукти аквакультури не можуть використовувати синтетичні амінокислоти в достатній кількості, в навколишнє середовище вивільняється більше азотних метаболічних відходів, що призводить до екологічних наслідків. Довголанцюгові ПНЖК, такі як докозагексаєнова кислота (ДГК) та ейкозапентаєнова кислота (ЕПК), є основними обмежувальними жирними кислотами в наземних рослинних оліях. Аналогічно, рослинні інгредієнти кормів містять антинутриєнти, які можуть змінювати структуру корисних бактерій у травному тракті організму-господаря та негативно впливати на метаболізм (Idenyi et al., 2022). Іншою проблемою рослинних кормів є те, що приблизно 70% фосфору в них зв'язаний з фітатом, що створює потенціал для евтрофікації, а також знижує засвоюваність білка і збільшує виведення азоту.



Побічні продукти як корм для аквакультури

Побічні продукти переробки риби

Щороку відходи світового рибальства становлять 25 % від загального обсягу морського рибальського вилову. Ця кількість перевищує 20 мільйонів тонн у всьому світі та 5 мільйонів тонн на рік у ЄС (Shahin et al., 2023). Приблизно 25–35% рибного борошна походить з побічних продуктів переробки риби, а приблизно 70% — з рибного господарства. Збір побічних продуктів переробки риби, як правило, не вважається економічно доцільним через логістичні та технічні обмеження (Sarker, 2023).

Найважливішим методом утилізації цих побічних продуктів є їх використання у кормових сумішах для худоби та аквакультурних видів. Згідно з Регламентом ЄС 1069/2009, побічні продукти рибного та аквакультурного господарства класифікуються як побічні продукти категорії 3, які дозволено включати до раціону тварин, щоб відповідально сприяти екологічній стійкості та охороні здоров'я населення (Gasco et al., 2020). Відходи рибного господарства можуть бути використані у виробництві FMFO (Li et al., 2019). Ензиматичний гідроліз відходів рибного господарства є ще однією технологією переробки відходів у гідролізати рибного білка (Gasco et al., 2020).

У дослідженні (Warwas, 2023) три різні побічні продукти переробки риби (філе та обрізки) були використані в кормах для райдужної форелі без розділення жирової та білкової фракцій. Результати показали, що можливість використання побічних продуктів як прямих інгредієнтів залежить від умов зберігання та переробки. Включення 50% свіжих обрізок анчоусів у корм призвело до збільшення росту, поліпшення споживання корму та збереження здоров'я кишечника. Однак використання цих побічних продуктів має і свої недоліки, такі як вміст білка та незамінних амінокислот, проблеми гігієни, термін придатності продукту та заборона, введена ЄС [Регламент (ЄС) № 1069/2009, що забороняє годування цими побічними продуктами тих самих видів аквакультури (Gasco et al., 2020)].

Харчові відходи

Харчові відходи також можуть використовуватися як джерело білка у виробництві кормів для аквакультури (Shahin et al., 2023). Харчові відходи включають сирі та приготовані харчові продукти, а також перероблені харчові залишки. За оцінками, щорічно утворюється приблизно 1,5 млрд тонн харчових залишків, що еквівалентно третині загального річного обсягу виробництва харчових продуктів для людей. Хоча ці харчові відходи не підходять для всіх видів аквакультури, вони можуть бути використані для деяких всеїдних видів, таких як тіляпія (Nasser et al., 2018), та інших видів з низьким трофічним рівнем, таких як трав'яний короп і кефаль (Mo et al., 2014). Однак, відповідно до принципу «обережності», що застосовується в політиці ЄС щодо безпеки харчових продуктів, використання харчових відходів для годування риби або вирощування комах не дозволяється (Fowles & Nansen, 2020).

Одноклітинні організми/білки



Мікроорганізми, включаючи мікрроводорості, морські водорості (макрроводорості), дріжджі, грибки, бактерії та інші альтернативні компоненти, мають значний потенціал у кормі для аквакультури завдяки вмісту білків/амінокислот, ліпідів або омега-3. Зі збільшенням використання цих мікроорганізмів в аквакультурі, а також завдяки технологічним інноваціям, також буде можливо зменшити вплив кормів для аквакультури на навколишнє середовище (Sarker, 2023). Ці організми можна вважати стійким джерелом кормів, оскільки вони швидко ростуть, використовують дуже мало прісної води і не потребують сільськогосподарських угідь для свого розмноження (Albrektsen et al., 2022).

Мікрроводорості (фітопланктон)

У аквакультурі мікрроводорості відіграють важливу роль як завдяки своєму впливу на водне середовище, так і завдяки своїй ролі як джерела поживних речовин (Wu & HU, 2023). Види мікрроводоростей становлять менше 1% фотосинтетичної біомаси Землі, проте вони забезпечують приблизно 50% глобальної біогенної фіксації вуглецю (Field et al., 1998). Це пояснюється тим, що глобальна популяція фітопланктону оновлюється в середньому кожні 2–6 днів (Behrenfeld et al., 2006). Крім того, мікрроводорості багаті на омега-3 ПНЖК, каротиноїди, незамінні амінокислоти, β -1–3-глюкан, мінерали та вітаміни.

Білок і олія мікрроводоростей також можуть замінити FMFO в кормах для аквакультури. Вміст сирого білка в мікрроводоростях коливається від 50% до 70% (Nagappan et al., 2021; Ma & Hu, 2023). Оскільки мікрроводорості можуть синтезувати всі амінокислоти *de novo*, їх амінокислотний профіль є добре збалансованим для кормів для водних тварин (Becker et al., 2013). Загальний вміст ліпідів у мікрроводоростях може досягати 45-60% у сухій масі клітин (Ahmad et al., 2022). Мікрроводорості можуть синтезувати з нуля омега-3 жирні кислоти, які також можуть задовольнити потреби аквакультури в незамінних жирних кислотах.

З появою промислового виробництва мікрроводоростей їх використання в кормах для аквакультури прискорилося. Серед морських мікрроводоростей *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis* sp. та *Schizochytrium* sp. вважаються перспективними кандидатами для використання в кормах для аквакультури. Зазначається, що мікрроводорості *Isochrysis* sp. можуть бути хорошою альтернативою FMFO в раціоні райдужної форелі та можуть використовуватися як добавки омега-3 та DHA в раціоні (Sarker et al., 2020). Нещодавно деякі компанії, що виробляють корми для аквакультури, почали виробляти багату на DHA олію з *Schizochytrium* sp. для використання в кормах для лосося (Tocher et al., 2020). Наразі надзвичайно висока вартість виробництва мікрроводоростей перешкоджає їх широкому використанню в аквакультурі (Nagappan et al., 2021).

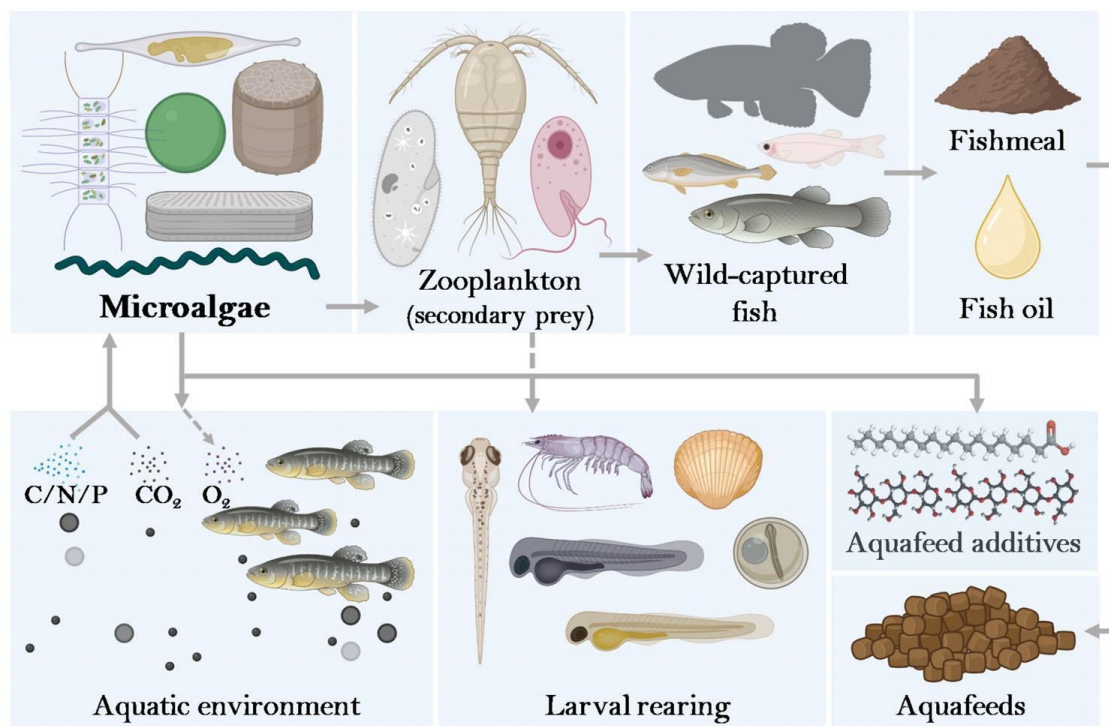


Рисунок 4.2. Роль мікрроводоростей, пов'язаних з аквакультурою (Biorender.com (Wu & Hu, 2023))

Водорості (макрроводорості)

Майже половина світового виробництва водоростей (тобто макроводоростей) в аквакультурі становить понад 11 мільярдів доларів США. Сьогодні понад 99% вирощування водоростей здійснюється в Азії, при цьому спостерігається значне зростання в Африці (ФАО, 2020). Більшість вироблених водоростей — це японська ламінарія (японська вакаме), яка використовується для споживання людиною.

В останні роки морські водорості набули важливого значення завдяки своїм біоремедіаційним властивостям, що забезпечують високу стійкість методу виробництва. Вміст поживних речовин у водоростях варіюється залежно від їхнього типу, наприклад, червоні, зелені та бурі, а також від сезону, причому вміст білка коливається від 6% до 38% у червоних водоростях, від 3% до 35% у зелених водоростях і від 2% до 17% у бурих водоростях. Рівень ліпідів також коливається в межах <1–13%, <1–3% та <1–10% відповідно (Nagappan et al., 2021). Більшість видів містять білки, багаті на незамінні амінокислоти, а також велику кількість незамінних омега-3 HUFA та PUFA. Вміст вуглеводів зазвичай є найважливішим компонентом (15–65%), залежно від виду (Nagappan et al., 2021). Кількість сирової клітковини, тобто полісахаридів, становить 25–75% від сухої ваги і не може бути легко перетравлена м'ясоїдними видами.

Загалом, зазначається, що коли до кормів для риб додають цілі водорості в невеликій кількості (<10%) замість рибного борошна, спостерігається поліпшення показників росту та пігментації риб (Ragaza et al., 2021). Однак, коли їх використання перевищує 10%, це негативно впливає на показники росту та засвоюваність поживних речовин (Qiu et al., 2018). Щоб водорості могли замінити рибне борошно як альтернативне джерело, вони повинні пройти біопереробку для



виділення та збагачення вмісту білка (Aasen et al., 2022). Ферментація також пропонується як інший перспективний процес біопереробки водоростей (Ang et al., 2021). Ці процеси все ще знаходяться на стадії розробки, а чинне законодавство ЄС (Регламент ЄС 68/2013) дозволяє використовувати біомасу водоростей, отриману шляхом сушіння та подрібнення, як інгредієнт корму без спеціального дозволу.

Дріжджі

Дріжджі вважаються альтернативним джерелом корму для аквакультури завдяки високому вмісту сирого білка (30–60 %). У кормах для аквакультури в якості білкових компонентів можуть використовуватися переважно *Saccharomyces cerevisiae*, різні види *Aspergillus* і *Fusarium venenatum*, а також інші штами, такі як *Candida utilis*, *Candida*, *Hansenula*, *Pichia*, *Torulopsis* і *Kluyveromyces marxianus* (Jones et al., 2020; Glencross et al., 2020). Дріжджі, переважно *Saccharomyces cerevisiae*, показали позитивні результати, виявляючи корисну імуностимулюючу активність, переважно при частковій заміні рибного борошна в раціоні лосося. Морські дріжджі (*C. sake*) містять 55% білка та значну кількість омега-3 жирних кислот. Крім того, засвоюваність *C. sake* у райдужної форелі також висока, і її можна використовувати в рецептурах раціонів до 20% від загального вмісту без побічних ефектів (Warwas, 2023).

Бактерії

Бактерії мають перевагу у вигляді швидкого росту на органічних субстратах, таких як метан, метанол, вуглекислий газ, водень і цукри (Matassa et al., 2020). Деякі штами бактерій можуть використовуватися для виробництва продуктів з дуже високим вмістом сирого білка (приблизно від 60% до 82% сухої маси клітин) і необхідних амінокислот (Ritala et al., 2016). Бактеріальна мука містить до 80% сирого білка (в середньому = 60%) і приблизно 10% жиру, що схоже на рибну муку (Albrektsen et al., 2022). Нещодавно було виявлено, що додавання фіолетових несірчаних бактерій, таких як *Rhodopseudomonas palustris* та *Rhodobacter capsulatus*, нового джерела мікробного білка, покращує показники росту, коефіцієнт конверсії корму та стійкість до хвороб і стресу у креветок (Alloul et al., 2021). Крім того, ці фіолетові фототрофні бактерії, вироблені з використанням стічних вод, можуть бути використані в кількості до 66% рибного борошна в раціоні морського окуня без будь-яких негативних наслідків для продуктивності риби (Delamare-Deboutteville et al., 2019).

Хоча бактеріальні білки є привабливими для майбутніх кормів для аквакультури, вони стикаються з такими проблемами, як високі виробничі витрати та обмежене глобальне застосування в якості корму для риб (Sarker et al., 2023).

Комахи в годівлі аквакультури

Індустрія кормів для аквакультури шукає альтернативи FMFO. У цьому контексті комахи можуть бути стійким джерелом білка для аквакультури, використовуючи харчові відходи. Було встановлено, що принаймні 16 із приблизно 1 мільйона відомих видів комах у всьому світі можуть слугувати альтернативними джерелами білка в аквакультурі (Guerreiro et al., 2020). Вісім видів комах показали обнадійливі результати (Alfiko et al., 2022). Серед них



найважливішими є такі види комах, як шовкопряд (*Bombyx mori*), *Hermetia illucens*, *Musca domestica*, *Tenebrio molitor* та цвіркуни. Зазначається, що ці види комах мають високий вміст сирого білка, який становить від 42 до 60 %, і за вмістом незамінних амінокислот вони порівнянні з рибним та соєвим борошном (Allegretti et al., 2017). Перевага кормів на основі комах полягає не тільки в кількості поживних речовин, які вони містять, але й у зменшенні їхнього впливу на навколишнє середовище, що пояснюється високою ефективністю переробки відходів та перетворення побічних продуктів на цінні кормові ресурси.

В одному з досліджень було встановлено, що морську муху (*Coelopa frigida*) можна вирощувати у стічних водах ферми, що виробляє бурі водорості, і що личинки морської мухи можуть замінити 40% рибного борошна в раціоні без негативного впливу на ріст і здоров'я кишечника райдужної форелі (Warwas, 2023). У дослідженнях було випробувано раціони, створені на різних стадіях розвитку комах, таких як личинки, лялечки та дорослі особини. Серед цих видів було встановлено, що чорна солдатська муха може використовуватися як комашиний борошно, особливо для райдужної форелі (*Oncorhynchus mykiss*) та атлантичного лосося (*Salmo salar*) (Lock et al., 2018).

Європейська комісія також схвалила включення комах до раціону водних організмів (Регламент 2017/893/ЄС, 2017). В результаті в Європі було створено багато підприємств для вирощування різних видів комах (Mancuso et al., 2019).

Низькотрофічні морські тварини

Морські тварини, що представляють особливий інтерес через їх потенційне використання як замінників FMFO, включають мідій, амфіпод і поліхет. Ці низькотрофічні організми отримують поживні речовини від первинних продуцентів, таких як фітопланктон, бактерії та водорості, а також від органічних відходів у морському середовищі.

Мідії, такі як зелені (*Perna viridis*) та блакитні (*Mytilus edulis*), є фільтруючими молюсками, які на даний момент становлять приблизно 56% від загального обсягу виробництва морських тварин в аквакультурі (FAO, 2020). Мідії можна описати як біореєдатори, які процвітають у багатих поживними речовинами середовищах, перетворюючи відходи поживних речовин на білок без додаткового корму. Вони містять 50–70% білка та 5–16% ліпідів у сухій масі, що схоже на рибне борошно (Jusadi et al., 2021). Основний ризик, пов'язаний з використанням мідій як корму, полягає у високому накопиченні важких металів (Rasidi et al., 2021).

Морські амфіподи — це ряд дрібних, переважно бентосних ракоподібних, що налічує понад 10 000 зареєстрованих видів. Вони можуть слугувати альтернативним джерелом живого корму для головоногих, креветок і морських коників, а також частково замінювати рибне борошно в аквакультурі риб і молюсків (Ashour et al., 2021). Морські амфіподи містять високий рівень білка, ПНЖК (ЕПК, ДГК) та амінокислот.

Поліхети (тобто кільчасті черви) — це біореєдатори, поширені по всьому світу, які харчуються на дні, споживаючи водорості та органічні речовини, що розкладаються або є відходами, перетворюючи їх на цінні поживні речовини. Багатоклітинні черви є важливим

джерелом їжі для комерційно важливих риб і ракоподібних (Khan et al., 2018). Традиційно вони використовуються як жива рибальська принада або як високоякісне джерело їжі для спеціальних дієт (Pombo et al., 2020). Вони містять велику кількість білка (55–60 % сухої ваги), ліпідів (12–28 % сухої ваги) та ПНЖК, а також добре збалансований склад амінокислот, вітамінів і мінералів (Wang et al., 2019).

	Nutritional Composition	Sustainability			Consumer Perception	Commercial Feasibility
		Environmental	Economic	Social		
F & A by-products	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Food wastes	↓	↑	↓	↓	↓	↓
Insects	↑	↑	↑	↑	↔	↑
SCO	↑	↑	↓	↑	↑	↓
Seaweed	↓	↑	↑	↑	↑	↑
Low-trophic marine animals	↑	↑	↑	↑	↑	↔

Рис. 4.3. Якісна оцінка потенціалу альтернативних інгредієнтів для кормів для аквакультури (за матеріалами Shahin et al., 2023)

2.2. Зменшення впливу аквакультурних кормів на навколишнє середовище d

У секторі аквакультури корми становлять приблизно 40–60 % витрат, а білок (рибне борошно) є найдорожчим поживним речовиною. 70 % рибного борошна, що використовується для задоволення потреб водних організмів, походить з промислового рибальства. Така ситуація чинить значний тиск на рибні ресурси та негативно впливає на їхню стійкість.

2.2.1. Аквакультура та питання сталого розвитку

Питання аквакультури та сталого розвитку можна розділити на три основні категорії: економічна, екологічна та соціальна стійкість (Odeja, 2021). Ключові стратегії для оцінки харчової та екологічної стійкості в аквакультурі можуть базуватися на трьох основних критеріях (Sarker et al., 2023)



1. *Перетравність інгредієнтів кормів*: Перетравність інгредієнтів кормів для аквакультури є важливим параметром для розробки економічно вигідних та екологічно стійких кормів. Необхідно визначити перетравність інгредієнтів. Таким чином, можна зменшити витрати на корми, забруднення поживними речовинами, такими як викиди фосфору та азоту, що спричиняють евтрофікацію, а також покращити коефіцієнт конверсії кормів.
2. *Коефіцієнт конверсії корму (FCR)*: Економічна перевага сталого виробництва кормів з використанням альтернативних інгредієнтів полягає головним чином у нижчому FCR. FCR є хорошим показником екологічної ефективності аквакультури, оскільки він вказує на потенційні негативні наслідки викидів фосфору та азоту у водне середовище, такі як евтрофікація, парникові гази, втрата біорізноманіття та вплив на інші екосистеми. Однак FCR в аквакультурі знизився з приблизно 3 до приблизно 1,35 в аквакультурі та з приблизно 2–2,25 до приблизно 0,9–1,2 у вирощуванні лосося, головним чином завдяки вдосконаленню рецептур кормів з 1970 року (Sarker et al., 2023).
3. *Оцінка життєвого циклу (LCA) для вимірювання екологічного впливу*: LCA може використовуватися для вимірювання впливу харчових систем, включаючи аквакультуру, на навколишнє середовище. Можна оцінити категорії екологічного впливу, включаючи сталий розвиток кормів, використання альтернативних інгредієнтів, ефективне використання ресурсів, таких як земля, вода та добрива, викиди, що сприяють глобальному потеплінню, викиди, що сприяють евтрофікації, втрату біорізноманіття та негативні зовнішні ефекти, такі як підкислення океану (Sarker et al., 2011). Необхідно розглянути вплив LCA виробництва високоякісних нових білків та жирів на FMFO в кормах.

Сталий розвиток виробництва аквакормів

Виробництво кормів становить найважливішу частину як екологічного, так і економічного впливу сучасних аквакультурних господарств; отже, сталий розвиток аквакультури можна досягти лише за допомогою використання стійких кормів (Warwas, 2023). Нові рекомендації Європейської комісії включають аквакультуру до стратегії ЄС «Від ферми до столу», яка має на меті прискорити перехід до стійкої європейської продовольчої системи. Стратегія підкреслює потенціал стійкої аквакультури у забезпеченні продовольством та кормами з низьким вуглецевим слідом, а також у створенні економічних можливостей та робочих місць (Odeja, 2021). Крім того, Комісія рекомендує виробникам кормів обмежити свою залежність від FMFO з диких запасів і замість цього використовувати альтернативні білкові інгредієнти, такі як водорості, комахи або відходи інших галузей промисловості. Однак сьогодні більшість комерційних кормів для аквакультури складаються з FMFO. Очікується, що попит на FMFO може перевищити пропозицію дрібної риби вже у 2037 році. Це означає, що промислові корми не є стійкими в комерційному масштабі в довгостроковій перспективі (Smárason, 2023). Для захисту морських екосистем та зменшення виснаження ресурсів океану корми для аквакультури повинні бути стійкими. Хоча основними альтернативними інгредієнтами кормів для аквакультури є соєві та кукурудзяні корми, їх виробництво піддається критиці, оскільки вони є нестійкими та мають погану засвоюваність. Тому циркулярна біоекономіка набуває все більшого значення для майбутнього галузі кормів для аквакультури (Bunting, 2021).

3. Практики управління кормовими ресурсами

3.1. Техніки точного годування

Інноваційні підходи, такі як гнучкі рецептури інгредієнтів, ферменти, оптимізовані мікробіоми та генетика, відіграють ключову роль у наближенні багатьох видів аквакультури до точного харчування. Точне годування передбачає розробку рецептури корму, яка дозволяє розкрити потенціал ДНК риб і ракоподібних, мікробіомів та метаболічних реакцій, тим самим запобігаючи захворюванням і сприяючи ефективному росту (Howell, 2022).

3.1.1. Харчування на основі мікробіома

Мікробіом все ще залишається «чорною скринькою» в галузі харчування в аквакультурі. Протягом останніх п'яти років значно зросла кількість наукових досліджень, присвячених вивченню мікробіому кишечника в контексті аквакультури. Нові технології генетичного секвенування дозволили скласти карту мікробних спільнот, що живуть у кишечнику понад 20 видів риб, вирощуваних у фермерських господарствах. У майбутньому профілювання складу мікробних спільнот кишечника, зокрема їх функцій або функціональних результатів у кишечнику, стане предметом подальших досліджень. Ця зміна проллє світло на поточні питання досліджень, такі як зв'язок між мікробним різноманіттям і виробництвом метаболітів. Це дозволить галузі встановити базові показники здоров'я кишечника. Зосередження уваги на функції мікробіома кишечника також призведе до поліпшення засвоюваності поживних речовин і продуктивності риб (Howell, 2022). У рамках перетину генетики та харчування генетичний відбір в аквакультурі тепер спрямований не тільки на стійкість до хвороб і поліпшення росту, але й на використання поживних речовин. Це зробить ще більш важливими точні методи годування, засновані на їх генетичних характеристиках.

3.1.2. Формулювання кормів на основі чистої енергії

Наступний етап у точному харчуванні вийде за межі заміни FMFO з рибного господарства альтернативними варіантами і передбачатиме використання всіх інгредієнтів кормів гнучким і стійким чином. В аквакультурі рецептура кормів базується головним чином на засвоюваній енергії (DE). У цій системі передбачається, що енергія використовується стандартним чином для росту. Головною причиною цього є те, що важко точно виміряти втрати енергії, що не пов'язані з фекаліями, у риб порівняно з наземними тваринами. Тому можна визначити, що використання значень метаболізованої енергії (ME) та чистої енергії (NE) замість значень DE для кормів для аквакультури надасть значні переваги (Groot et al., 2021). Щоб здійснити цей перехід і використовувати кормові інгредієнти більш стійким чином, галузь могла б прийняти рецептури кормів, які зосереджуються на чистій енергії, а не на засвоюваній енергії. Ключова відмінність між цими двома системами полягає в тому, що система перетравної енергії передбачає, що всі макроелементи раціону використовуються рибами однаково. На відміну від цього, система чистої енергії передбачає, що білки, жири та вуглеводи в раціоні риб використовуються по-різному. В останні роки фахівці з харчування в аквакультурі досягли значного прогресу в розробці моделей чистої енергії для різних видів риб (Howell, 2022).



Оскільки вплив кормів на навколишнє середовище визначається насамперед їхнім складом, існує можливість зменшити вплив аквакультури на навколишнє середовище шляхом розробки кормів з меншим впливом на навколишнє середовище (Wilfart et al., 2023). У деяких дослідженнях потенційний вплив кормів на навколишнє середовище враховувався при розробці рецептур кормів (Mackenzie et al., 2016). Складання рецептур кормів відповідно до екологічних та економічних критеріїв можна розглядати як інноваційний підхід до вирішення сучасних проблем тваринництва (Garcia-Launay et al., 2018).

3.1.3. Багатоцільове (МО) формулювання кормів

Формулювання МО-кормів, яке має на меті досягти балансу між зниженням витрат і зменшенням впливу на навколишнє середовище, можна розглядати як перспективне рішення для зменшення екологічного сліду аквакультурного виробництва (Wilfart et al., 2023). Нещодавно Garcia-Launay et al. (2018) розробили багатоцільову (МО) формулу, яка використовує обмеження формули найменших витрат (вміст поживних речовин та додавання інгредієнтів корму) і обчислює МО-функцію, що включає як вартість корму, так і показники впливу на навколишнє середовище, отримані за допомогою LCA (тобто зміна клімату, використання невідновлюваних джерел енергії, попит на фосфор, землекористування). Однак на ріст риби може суттєво впливати тип сировини для кормів. Наприклад, заміна всього FMFO на сирі рослинні інгредієнти зменшила ріст райдужної форелі на 30% (Lazzarotto et al., 2018). Було розроблено багатоцільовий метод формулювання кормів, який враховує як вартість, так і вплив на навколишнє середовище (оцінений за допомогою LCA) кормової суміші. На першому етапі найменш затратний склад корму забезпечує базовий рівень вартості корму та потенційного впливу на кг корму. На другому етапі мінімізована функція МО включає нормалізовані значення вартості корму та впливу на зміну клімату, попит на фосфор, попит на невідновлювані джерела енергії та землекористування. Додатковий фактор враховує відносний вплив економічних та екологічних цілей.

Потенціал методу приготування кормів МО був оцінений за допомогою двох сценаріїв формулювання кормів для свиней, бройлерів та молодих биків. У порівнянні з базовими кормами, корми, сформульовані за методом МО, мали менший вплив на навколишнє середовище (від -2 до -48%) та дещо вищу вартість (1-7%) в обох досліджених сценаріях, за винятком земельних ресурсів, зайнятих для виробництва кормів для бройлерів. Розроблений метод доповнює інші стратегії і повинен бути досліджений у майбутньому з метою оптимізації всієї системи тваринництва для значного зменшення пов'язаного з нею впливу (Garcia-Launay et al., 2018). Формулювання МО може бути використане як цінний інструмент для зменшення екологічного сліду аквакультурного виробництва без погіршення продуктивності тварин або обов'язкового збільшення виробничих витрат (Wilfart et al., 2023).

3.2. Технології попередньої обробки та ферментовані корми для годування аквакультури

Рослинні корми часто використовуються як основне джерело білка в кормах для аквакультури через їх широку доступність і низьку вартість. Однак вони зазвичай містять високий рівень некрохмальних полісахаридів (NSP), що обмежує їх використання в кормах для аквакультури,



особливо для хижих риб. Вони також мають низьку смакові якості, незбалансований амінокислотний профіль і містять антинутриційні фактори (ANF), що обмежує їх використання і збільшує виробництво відходів. Тому ефективне використання цих інгредієнтів в аквакультурі представляє великий інтерес.

Ферментація кормів є економічно ефективним технологічним процесом, який може знизити рівень ANF, одночасно покращуючи засвоюваність поживних речовин і виробництво різних біоактивних сполук, підвищуючи поживну цінність інгредієнтів кормів для аквакультури. Ферментація в твердому стані в першу чергу характеризується використанням мікроорганізмів, таких як нитчасті гриби, які ефективно проникають в субстрат завдяки низькому вмісту вільної води та росту гіф (Šelo et al., 2021). Тому її можна ферментувати за допомогою мікроорганізмів, таких як *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus subtilis* та *Bacillus licheniformis*, і використовувати в твердофазній або вологофазній ферментації. Ці організми можуть впливати на корми, виробляючи різні ферменти, включаючи фітази, ліпази, протеази та карбогідрази, такі як целюлази та ксиланази. Гриби, зокрема, визначаються як збагачувачі лігноцелюлозних матеріалів мікробними білками та ферментами. Таким чином, вміст сирової клітковини зменшується. Навпаки, сирий білок, розчинність білка та перетравність білка і клітковини збільшуються (Godoy et al., 2018), тим самим підвищуючи поживну цінність рослинних кормів для використання в аквакультурі. Якщо потрібно сформувати твердофазний ферментований корм, ферментовану суміш залишають висихати в умовах температури та середовища, які не пошкоджують поживні речовини (Vieira et al., 2023; Zengin et al., 2022).

4. Пом'якшення наслідків окислення океану

Океани є природними карбонатними буферними системами, які діють як поглиначі вуглецю в навколишньому середовищі, що значно перевищує вміст вуглецю в атмосфері та на суші. Океан є чудовим буфером для нейтралізації невеликих змін у своєму складі. У міру того, як все більше атмосферного CO₂ розчиняється в океанській воді, вуглець вивільняється з океанського поглинача вуглецю, що робить океани більш кислими (Ebenezzar et al., 2023). Океани поглинають CO₂ з атмосфери, діючи як буфер для рівнів CO₂ в атмосфері. Якщо океани поглинають більше CO₂, це призводить до зниження рН морської води, концентрації карбонатних іонів та концентрації мінералів карбонату кальцію (CaCO₃), створюючи ситуацію, відому як «закислення океану» (Reid et al., 2019).

Оскільки одночасно відбуватиметься підвищення рівня CO₂ (зниження рН і насичення арагонітом) і температури, а також зміни солоності і, в деяких випадках, зниження рівня кисню (Boyd et al., 2015). Закислення океану і температура взаємопов'язані. З огляду на потенціал негативної синергії, підвищення температури вважається «злим близнюком» закислення океану. Зростання рівня кислотності морської води також негативно впливає на фізіологію та метаболізм водних видів, порушуючи міжклітинні механізми транспорту. Повідомляється, що личинки, які піддаються впливу морської води з нижчим рН, мають нижчий рН шлунка, що призводить до зниження ефективності травлення та збільшення споживання їжі (Stump et al.,



2013). Теплі кліматичні умови також призведуть до виснаження кисню у воді, що спричинить зменшення фітопланктону. Планктон відіграє важливу роль у регулюванні світового клімату, поглинаючи викиди CO₂. Фітопланктон забезпечує приблизно половину глобального фотосинтезу і відіграє вирішальну роль у пом'якшенні глобального потепління (Huertas et al., 2011).

4.1. Буферні агенти для пом'якшення кислотності океану

Включення буферних агентів у рецептури кормів допомагає протидіяти впливу окислення океану на фізіологію травлення видів аквакультури. Буферні агенти в рецептурах кормів нейтралізують або стабілізують pH у травному тракті, забезпечуючи оптимальні умови для засвоєння поживних речовин.

Буферні агенти:

- *Водорості* зменшують кислотність океану та компенсують викиди. Морські водорості, включаючи ламінарію, також зменшують кислотність океану, вилучаючи вуглекислий газ з води, і діють як місцевий «буферний» агент, що приносить користь багатьом морським видам. Морські водорості також виробляють розчинений кисень, зменшуючи поширення «мертвих зон» у воді. Також досліджується можливість великомасштабного вирощування морських водоростей як засобу видалення та поглинання вуглекислого газу з глибин океану (NOAA Fisheries, 2022).
- *Неорганічні буфери*: зазвичай це сполуки, такі як бікарбонат натрію (NaHCO₃), карбонат кальцію (CaCO₃) або гідроксид магнію (Mg(OH)₂), які зазвичай використовуються для підтримки стабільності pH.
- *Органічні буфери*: сполуки, такі як солі лимонної кислоти (наприклад, цитрат натрію) або органічні кислоти (наприклад, мурашина або молочна кислота), також є потенційними буферними агентами. Вони, як правило, мають більш специфічну буферну здатність і можуть також сприяти здоров'ю кишечника, впливаючи на мікробіологічні спільноти.
- *Фітохімічні речовини та рослинні буфери*: Деякі рослини виробляють сполуки, які можуть природним чином буферизувати рівні pH та надавати додаткові переваги, такі як антиоксидантні властивості або протизапальні ефекти. Вони можуть бути корисними в органічних або стійких системах аквакультури

У висновку, додавання буферних речовин до кормів для аквакультури є перспективною стратегією для пом'якшення наслідків окислення океану. Такий підхід не тільки сприяє здоров'ю та росту вирощуваних видів, але й підвищує стійкість систем аквакультури до кліматичних змін.

4.2. Стратегії харчування для пом'якшення наслідків окислення океану

В аквакультурі підвищення стійкості до кислих умов є надзвичайно важливим питанням, особливо в контексті окислення океану, для розробки ефективних стратегій годівлі та кормів



для сталого розвитку аквакультури (Parker et al., 2024). Це може мати негативний вплив на морське життя, особливо на види, які для оптимального росту, розвитку та здоров'я залежать від стабільного рівня рН, такі як риба, молюски та ракоподібні. Слід розробити стратегії годівлі та кормів, які підвищують витривалість, покращують здоров'я та збільшують стійкість до стресу.

Деякі стратегії годівлі для пом'якшення кислотності:

- 1. Використання мінералів.** У кислих умовах доступність кальцію та магнію у воді може зменшитися, а ці мінерали необхідні для підтримки цілісності панцирів молюсків та ракоподібних. Низький рН може впливати на розчинність мікроелементів у воді, тому додавання їх до кормів може сприяти здоров'ю риб та молюсків. Отже, додавання до кормів високобіодоступних форм кальцію та магнію може допомогти цим видам добре підтримувати свої панцирі та правильно рости.
- 2. Використання вітамінів.** У стресових умовах, таких як підкислення, риба та молюски можуть зазнавати окисного стресу, який можна пом'якшити за допомогою адекватного додавання вітаміну С до кормів. Вітамін Е є потужним антиоксидантом, який допомагає захищати клітини від окисного пошкодження, спричиненого стресовими факторами навколишнього середовища, включаючи підкислення. Вітаміни групи В, такі як В1 (тіамін), В2 (рибофлавін) і В12 (кобаламін), відіграють важливу роль в енергетичному обміні, функціонуванні нервової системи та загальній стресостійкості.
- 3. Незамінні амінокислоти та жирні кислоти.** У стресових умовах, спричинених підкисленням океану, метаболізм і синтез білків в організмах тварин, що вирощуються в аквакультурі, можуть змінюватися. Додавання до раціону амінокислот, таких як метіонін, лізин і треонін, може допомогти підтримувати ріст, відновлення тканин і імунну відповідь в цих стресових умовах, що є необхідним для зменшення запалення, підтримки імунної функції та сприяння загальному росту. Доповнення раціону аквакультурних тварин ЕРА і ДНА може допомогти полегшити деякі несприятливі фізіологічні ефекти підкислення.
- 4. Пробіотики та пребіотики.** Додавання корисних мікроорганізмів, що безпосередньо потрапляють в організм, може бути особливо важливим у підкислених водах, де стрес від змін рН може призвести до порушення балансу мікробіома кишечника або ослаблення імунітету. Пребіотики також можуть поліпшити травлення та загальний стан здоров'я, живлячи корисні бактерії в кишечнику. Сприяючи здоровому мікробіому, види аквакультури можуть краще справлятися зі стресом навколишнього середовища.
- 5. Антиоксиданти та фітохімічні речовини.** У кислих середовищах реактивні форми кисню мають тенденцію до накопичення, що призводить до окисного стресу. Додавання до кормів природних антиоксидантів, таких як каротиноїди та поліфеноли, може допомогти зменшити окислювальне пошкодження та підвищити стійкість.



5. Підвищення ефективності корму та його засвоюваності

5.1. Екструзійна обробка

Екструзійна обробка — це метод, який застосовується для приготування та пастеризації компонентів корму або корму шляхом короткочасного впливу на них високих температур і тиску, що дозволяє усунути всі ANF і підвищити споживання корму, засвоюваність поживних речовин і, як наслідок, ріст риби. Екструдовані таким чином кормові інгредієнти сприяють підвищенню рівня ліпідів у кормі, желатинізації крохмалю та підвищенню засвоюваності білків і енергії корму. Екструзія також є важливою в аквакультурі, оскільки вона позитивно впливає на фізичні властивості, такі як зменшення дрібності, плавучість і занурення.

Використання ферментних добавок

Використання ферментних добавок для поліпшення перетравності кормових інгредієнтів і підвищення засвоєння поживних речовин, що дозволяє максимізувати ріст і здоров'я в мінливих умовах навколишнього середовища, має вирішальне значення для годування в аквакультурі. Зокрема, додавання ферментів до екструдованих кормів для риб з метою поліпшення перетравності фосфору, вуглеводів і білків може підвищити екологічну стійкість за рахунок зменшення викидів сполук з риб у воду. У цьому контексті також важливо розробляти корми, які зберігають свою перетравність незважаючи на зміну температури води, що може відбуватися через високу або низьку температуру води, пов'язану з глобальним потеплінням.

Оскільки в умовах холодної води температура плавлення жирних кислот у кормі підвищується, засвоюваність знижується, що негативно впливає на FCR. Цей ефект набагато більш виражений у холодній воді, ніж у теплій. Тому необхідно підвищити загальну засвоюваність жирів, зокрема за допомогою ліпаз (Howell, 2022). Протеазні ферменти можуть стимулювати ендогенні пептидази, покращуючи перетравність білків і гідролізуючи білкові антинутрієнти, такі як лектини, інгібітори трипсину, антигенні білки та антинутрієнтні алергенні білки, включаючи гліцинін, β -конгліцинін і кафрин (Cowieson, 2008). Використання рослинних кормів, багатих на НСП, у травному тракті риб, ферментів, таких як ксиланази, глюканази та целюлази, може підвищити засвоюваність та використання поживних речовин, що містяться в альтернативних інгредієнтах (Sarker, 2023).



5.2. Функціональні кормові добавки

Функціональні кормові добавки — це кормові добавки, які додаються до кормових сумішей для забезпечення основних потреб у поживних речовинах традиційних кормів, а також для поліпшення росту та здоров'я аквакультури. Їх використання в кормових сумішах для аквакультури дає такі переваги, як поліпшення здоров'я кишечника та корисних кишкових бактерій, збільшення виробництва ферментів і стимулювання апетиту, що, в свою чергу, призводить до поліпшення показників росту. Крім того, ці кормові добавки можуть пом'якшити негативний вплив аквакультури на навколишнє середовище шляхом поліпшення якості води та сприяння використанню альтернативних білків у кормах для аквакультури (Onomu & Okuthe, 2024).

Використання наземних рослинних білків як часткової або повної заміни рибного борошна вимагає використання кормових добавок. Антибіотики та хіміотерапевтичні засоби, що використовуються в аквакультурі, можуть призвести до розвитку антибіотикорезистентних штамів бактерій і знищення небажаних природних мікроорганізмів, а також до проблем із залишками антибіотиків у продуктах для людей. З іншого боку, пробіотики, пребіотики та фітогенні речовини можуть використовуватися як функціональні кормові добавки для запобігання або зменшення захворювань та підвищення імунітету організму (Van Doan et al., 2020). Однак про функціональні кормові добавки в аквакультурі доступно менше інформації, ніж про такі добавки для інших тварин, особливо щодо їхнього впливу на стійкість аквакультури (Onomu & Okuthe, 2024).

Роль функціональних кормових добавок у забезпеченні сталого розвитку на основі їх п'яти основних впливів на аквакультуру:

1. Підвищення ефективності використання кормів
2. Покращення сталого використання ресурсів
3. Підвищення стійкості до захворювань та імунітету
4. Підвищення стійкості до паразитів
5. Покращення якості води

Пробіотики (прямі кормові мікроорганізми: DFM), пребіотики та симбіотики

Корисні мікроорганізми та пребіотичні сполуки в кормах підтримують здоров'я кишечника, зміцнюють імунітет та покращують загальну ефективність кормів в умовах стресових факторів, пов'язаних із глобальним потеплінням.

Пробіотики

Пробіотики визначаються як живі кормові добавки, які мають корисний вплив, покращуючи мікробіологічний баланс кишечника у тварин-господарів (Fuller, 1989). Ці речовини сприяють росту або розвитку, збільшуючи споживання корму, його використання або впливаючи на імунну систему тварин (Demir et al., 2003). Пробіотики є загальновизнаною функціональною кормовою добавкою в кормі для аквакультури. Хоча існує багато визначень пробіотиків, таких



як «живі мікроорганізми, які при введенні в достатніх кількостях надають користь для здоров'я організму-господаря», ці визначення підходять для наземних тварин і людей, але не для водних тварин. Це пов'язано з тим, що водні тварини і мікроорганізми співіснують в одному водному середовищі. У водних тварин взаємодія між мікроорганізмами (включаючи пробіотики) та організмом-господарем відбувається не тільки в кишечнику, але й у навколишній воді (Onomu & Okuthe, 2024).

Бактеріальні патогени стають все більш стійкими до антимікробних препаратів, пестицидів та дезінфікуючих засобів, що використовуються для боротьби з хворобами водних організмів. З цієї причини дослідження пробіотиків в аквакультури користується великим попитом, щоб забезпечити екологічно чисту, стійку аквакультуру як альтернативу антибіотикам. На жаль, рослинні інгредієнти можуть мати кілька негативних наслідків для харчування в аквакультури (Nielsen et al., 2022). Пробиотики стабілізують мікробіологічну популяцію шлунково-кишкового тракту риб шляхом усунення патогенних мікроорганізмів та підвищення засвоюваності та біодоступності поживних речовин (Oscar et al., 2020).

Бактерії, дріжджі та водорості широко використовуються як пробіотики в аквакультури. Ефекти пробіотиків можна класифікувати на дві групи відповідно до мети лікування (Nathanailides et al., 2021):

- Параметри росту та благополуччя риб, включаючи вплив на параметри росту риб та конверсію корму, мікробіоту та анатомію кишечника, імунітет та стійкість до патогенів.
- Параметри навколишнього середовища, включаючи рибні ставки та/або резервуари (якість води, різноманітність водної мікробіоти).

Було виділено та оцінено ряд пробіотичних мікроорганізмів для використання в аквакультури з метою профілактики та боротьби з інфекційними захворюваннями у видів, що вирощуються в аквакультури. Результати двох досліджень з використанням двох комерційних пробіотиків для оцінки впливу пробіотиків на жіночих особин райдужної форелі (Akbari Nargesi et al., 2020) та нільської тілапії (*Oreochromis niloticus*) (El-Kady et al., 2022) показали, що пробіотики можуть поліпшити репродуктивні параметри, зменшити загальний вміст аміачного азоту та аміаку, а також підвищити показники росту та використання корму в порівнянні з контрольною групою.

Пробиотики та симбіотики

Пробиотики — це неперетравлювані кормові добавки, що складаються переважно з олігосахаридів, які стимулюють і метаболізують корисні мікроорганізми в шлунково-кишковому тракті, одночасно покращуючи здоров'я організму-господаря (Bozkurt et al., 2014). Щоб кормова добавка була класифікована як пробіотик, вона повинна досягати товстої кишки без перетравлення, бути стійкою до кислотності шлунка, гідролізуватися травними ферментами та засвоюватися шлунково-кишковим трактом (Davani-Davari et al., 2019). Корисність пробіотиків як кормових добавок пов'язана з побічними продуктами, що утворюються під час ферментації бактеріями в кишечнику. Основними видами пробіотиків, що використовуються в аквакультури, є мананоолігосахариди (MOS), фруктоолігосахариди



(FOS), галактоолігосахариди (GOS), арабіноксиланові олігосахариди (AXOS), інουλін та β -глюкан.

Пробіотики, змішані з різними штамами пробіотиків або пребіотиками (симбіотики), дають кращі результати з точки зору росту та здоров'я в порівнянні з пробіотиками/пребіотиками окремо. Це пов'язано з тим, що використання декількох штамів або симбіотиків вважається взаємодоповнюючим, що розширює спектр їх впливу на організм-господаря (Puvanasundram et al., 2021). Widanarni et al. (2019) показали, що додавання до раціону мананоолігосахаридів (MOS) через *Artemia* sp. може значно поліпшити активність травних ферментів після личиночного періоду, ріст, виживаність та стійкість до інфекції *Vibrio harveyi*. Додатки до раціону в кількості 1,5 г/кг β -1,3 глюкану та фруктоолігосахаридів у тихоокеанських білих креветок (*Litopenaeus vannamei*) можуть бути ефективними для підвищення ростових показників та антиоксидантної активності, а також для поліпшення неспецифічного імунітету та стійкості до захворювань (Eissa et al., 2023).

Фітогенні речовини

Фітогенні речовини — це група кормових добавок, що отримуються з листя, стебел, коренів, насіння, бульб, плодів, чагарників і спецій. Фітогенні речовини зазвичай стимулюють апетит, зміцнюють корисну кишкову мікрофлору і використовуються у тваринництві завдяки своїм антиоксидантним, антимікробним, протираковим, знеболювальним і протипаразитарним властивостям. Оскільки вони містять активні сполуки, вони також можуть мати токсичний ефект. Їхні властивості та ефективність є дуже мінливими і залежать від частини рослини, що використовується, методу екстракції, концентрації, сезону збору врожаю та географічного розташування (Onomu & Okuthe, 2024).

В одному дослідженні дві фітогенні кормові добавки, одна з яких була багата на карвакрол, а інша — на тимол, поліпшили ефективність корму порівняно з контрольною дієтою та підвищили антиоксидантні захисні властивості у райдужної форелі (*Oncorhynchus mykiss*) (Giannenas et al., 2012). Вони також регулювали мікробіологічні спільноти кишечника, негативно впливаючи на загальну кількість анаеробів. У дослідженні Abdel-Latif et al. (2020) було вивчено застосування ефірної олії чебрецю (ОЕО) у раціоні молодняка коропа (*Cyprinus carpio* L.). При порівнянні риб, яких годували ОЕО, з контрольною групою, було виявлено помітне поліпшення морфологічних параметрів кишечника. Ghafarifarsani et al. (2022) досліджували вплив кверцетину, ефірної олії чебрецю та вітаміну С на раціон звичайного коропа (*Cyprinus carpio*). Вони виявили, що риби, яких годували раціоном з кверцетином, мали вищий рівень антиоксидантів у сироватці та печінці, включаючи каталазу, супероксиддисмутазу, глутатіонпероксидазу та глутатіонредуктазу, після 60-денного випробування раціону. Вплив екстракту майорану на звичайного коропа, *Cyprinus carpio*, досліджували Yousefi et al. (2021). Максимальна кінцева вага, приріст ваги та питома швидкість росту, а також найнижчий коефіцієнт конверсії корму (FCR) були зафіксовані при додаванні 200 мг/кг екстракту майорану до раціону.

Антистресові кормові добавки



Найважливішим наслідком зміни клімату є стрес, який вона спричинить в аквакультурі через екологічні фактори. Останніми роками все більше досліджень присвячується зменшенню стресу у риб. Окрім розробки нових технологій для поліпшення екологічних умов аквакультури, важливо додавати до кормів корисні добавки, щоб пом'якшити реакцію на типові стресові фактори. Використання різних добавок у раціоні риб для пом'якшення реакції на стрес було широко досліджено. У цих дослідженнях повідомляється про імунологічні, харчові та метаболічні зміни, які завжди пов'язані з ендокринними процесами. Біохімічна природа та фізіологічна функціональність цих кормових добавок значно впливають на реакцію на стрес, оскільки вони можуть діяти як нейротрансмітери або попередники гормонів, енергетичні субстрати, кофактори та інші необхідні елементи, що, в свою чергу, створює реакції багатьох систем та органів (Herrera et al., 2019).

Деякі кормові добавки, що зменшують фізіологічний вплив стресу, — це ліпіди та жирні кислоти, вітаміни, мінерали, амінокислоти, нуклеотиди, пребіотики та антиоксиданти. Дінг та ін. (2022) дослідили вплив синтетичних ПНЖК на зниження впливу температури на корали. Вони виявили, що розвиток личинок та їх осідання були значно покращені в групі, яка отримувала харчові добавки, тоді як рівень супероксиддисмутази, каталази та смертності стресованих коралів знизився. В іншому дослідженні вивчався потенційний імуномодуючий вплив *Astragalus membranaceus* (AM) та *Glycyrrhiza glabra* (солодка) на жовту окунь (*Perca flavescens*), де були змінені значення параметрів стресу (Elabd et al., 2016). Протягом експерименту вони повідомили, що введення в раціон AM і солодки значно покращило показники росту, антиоксидантні властивості та імунну відповідь – всі ці фактори є корисними як природні засоби для зняття стресу.

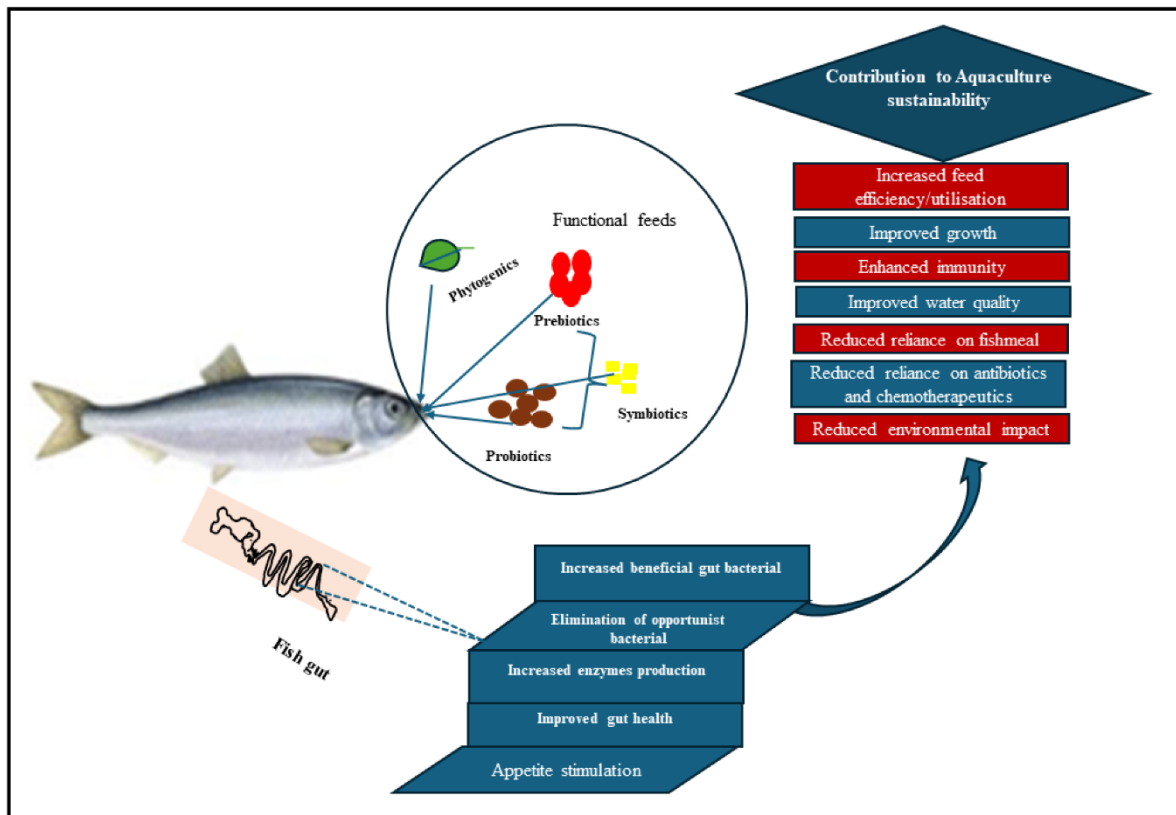


Рисунок 4.4. Вплив функціональних кормових добавок в аквакультурі (за матеріалами Ononi & Okuthe, 2024)

Висновок

Глобальне потепління може призвести до підвищення температури води, що збільшить швидкість метаболізму видів, які вирощуються в аквакультурі, і вимагатиме змін у складі кормів для задоволення підвищених потреб у поживних речовинах. Необхідно скоригувати співвідношення білків, ліпідів і вуглеводів у кормах, щоб адаптуватися до мінливих метаболічних потреб і забезпечити оптимальний ріст і здоров'я видів. Оскільки запаси риби, що використовуються для виробництва рибного борошна та риб'ячого жиру, зазнають впливу кліматичних змін, альтернативні джерела білка, такі як борошно з комах, водорості та рослинні білки, стають важливими для сталого корму для аквакультури. Для зменшення екологічного сліду необхідні інновації у складі кормів, такі як використання інгредієнтів, отриманих з відходів, та оптимізація коефіцієнтів конверсії кормів. Застосування передових технологій годівлі, таких як автоматичні годівниці та моніторинг у реальному часі, є важливим для оптимізації розподілу кормів, зменшення відходів та забезпечення ефективного використання ресурсів. Частоту та кількість годування слід змінювати відповідно до змін апетиту та темпів росту видів у мінливих температурних умовах.

До складу кормів слід додавати буферні речовини, щоб компенсувати вплив окислення океану на фізіологію травлення аквакультурних видів. Доцільно розробляти стратегії годівлі, що підвищують стійкість аквакультурних видів до кислих умов, наприклад, включаючи мінерали та вітаміни, що сприяють стресостійкості. Використання ферментних добавок для поліпшення перетравності кормових інгредієнтів та підвищення засвоєння поживних речовин має вирішальне значення, оскільки дозволяє максимізувати ріст і здоров'я в мінливих умовах навколишнього середовища. Додавання корисних мікроорганізмів та пребіотичних сполук до кормів для підтримки здоров'я кишечника, підвищення імунітету та загальної ефективності кормів в умовах стресових факторів, пов'язаних з глобальним потеплінням, підвищить ефективність.

Список використаних джерел

- Aasen, I. M., Sandbakken, I. S., Toldnes, B., Roleda, M. Y., & Slizyte, R. (2022). Enrichment of the protein content of the macroalgae *Saccharina latissima* and *Palmaria palmata*. *Algal research*, 65, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102727>
- Abdel-Latif, H. M., Abdel-Tawwab, M., Khafaga, A. F., & Dawood, M. A. (2020). Dietary oregano essential oil improved the growth performance via enhancing the intestinal morphometry and hepato-renal functions of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings. *Aquaculture*, 526, 735432. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735432>
- Ahmad, A., W. Hassan, S., & Banat, F. (2022). An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521–9547. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2061148>
- Ahmed, N., Thompson, S., & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental management*, 63, 159–172. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-3>
- Akbari Nargesi, E., Falahatkar, B., & Sajjadi, M. M. (2020). Dietary supplementation of probiotics and influence on feed efficiency, growth parameters and reproductive performance in female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) broodstock. *Aquaculture Nutrition*, 26(1), 98–108. <https://doi.org/10.1111/anu.12970>
- Albrektsen, S., Kortet, R., Skov, P. V., Ytteborg, E., Gitlesen, S., Kleinegris, D., ... & Øverland, M. (2022). Future feed resources in sustainable salmonid production: A review. *Reviews in aquaculture*, 14(4), 1790–1812. <https://doi.org/10.1111/raq.12673>
- Alfiko, Y., Xie, D., Astuti, R. T., Wong, J., & Wang, L. (2022). Insects as a feed ingredient for fish culture: Status and trends. *Aquaculture and fisheries*, 7(2), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.10.004>
- Allegretti, G., Schmidt, V., & Talamini, E. (2017). Insects as feed: species selection and their potential use in Brazilian poultry production. *World's poultry science journal*, 73(4), 928–937. <https://doi.org/10.1017/S004393391700054X>
- Alloul, A., Wille, M., Lucenti, P., Bossier, P., Van Stappen, G., & Vlaeminck, S. E. (2021). Purple bacteria as added-value protein ingredient in shrimp feed: *Penaeus vannamei* growth performance, and tolerance against *Vibrio* and ammonia stress. *Aquaculture*, 530, 735788. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735788>
- Amin, M. N., Barnes, R. K., & Adams, L. R. (2014). Effect of temperature and varying level of carbohydrate and lipid on growth, feed efficiency and nutrient digestibility of brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill, 1814). *Animal feed science and technology*, 193, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.04.016>
- Amin, M. N., Carter, C. G., Katersky Barnes, R. S., & Adams, L. R. (2016). Protein and energy nutrition of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) at optimal and elevated temperatures. *Aquaculture nutrition*, 22(3), 527–540. <https://doi.org/10.1111/anu.12274>



- Ang, C. Y., Yong, A. S. K., Azad, S. A., Lim, L. S., Zuldin, W. H., & Lal, M. T. M. (2021). Valorization of macroalgae through fermentation for aquafeed production: A review. *Fermentation*, 7(4), 304. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040304>
- Ashour, M., Abo-Taleb, H. A., Hassan, A. K. M., Abdelzaher, O. F., Mabrouk, M. M., Elokaby, M. A., & Mansour, A. T. (2021). Valorization use of amphipod meal, *Gammarus pulex*, as a fishmeal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. *Journal of marine science and engineering*, 9(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/jmse9121336>
- Becker, E. W. (2013). Microalgae for aquaculture: nutritional aspects. *Handbook of microalgal culture: applied phyecology and biotechnology*, 671–691. ISBN:9780470673898.
- Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., & Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Blacher, E., Levy, M., Tatrovsky, E., & Elinav, E. (2017). Microbiome-modulated metabolites at the interface of host immunity. *The journal of immunology*, 198(2), 572–580. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1601247>
- Boyd, C. E., McNevin, A. A., & Davis, R. P. (2022). The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. *Food security*, 14(3), 805–827. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01246-9>
- Bozkurt, M., Aysul, N., Küçükyilmaz, K., Aypak, S., Ege, G., Catli, A. U., ... & Çınar, M. (2014). Efficacy of in-feed preparations of an anticoccidial, multienzyme, prebiotic, probiotic, and herbal essential oil mixture in healthy and *Eimeria* spp. – infected broilers. *Poultry science*, 93(2), 389–399. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03368>
- Bunting, M. (2021). *Making fish feed greener: by-products the key to a sustainable aquaculture industry*. 22 September 2021. <https://disruptr.deakin.edu.au/environment/making-fish-feed-greener-by-products-the-key-to-a-sustainable-aquaculture-industry/>
- Cheung, W. W. L., Maire, E., Oyinola, M. A., Robinson, J. P. W., Graham, N. A. J., Lam, V. W. Y., McNeil, M. A., & Hicks, C. C. (2023). Climate change exacerbates nutrient disparities from seafood. *Nature Climate Change*, 13, 1242–1249. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01822-1>
- Cottrell, R. S., Blanchard, J. L., Halpern, B. S., Metian, M., & Froehlich, H. E. (2020). Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030. *Nature food*, 1(5), 301–308. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0078-x>
- Cowieson, A. J., & Ravindran, V. (2008). Effect of exogenous enzymes in maize-based diets varying in nutrient density for young broilers: growth performance and digestibility of energy, minerals and amino acids. *British poultry science*, 49(1), 37–44. <https://doi.org/10.1080/0007166070181298>
- Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S. J., & Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>
- Delamare-Deboutteville, J., Batstone, D. J., Kawasaki, M., Stegman, S., Salini, M., Tabrett, S., & Hülsen, T. (2019). Mixed culture purple phototrophic bacteria is an effective fishmeal replacement in aquaculture. *Water research X*, 4, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100031>
- Demir, E., Sarica, Ş., Özcan, M. A., & Sui Mez, M. (2003). The use of natural feed additives as alternatives for an antibiotic growth promoter in broiler diets. *British poultry science*, 44(S1), 44–45. <https://doi.org/10.1080/713655288>
- Ding, D. S., Wang, S. H., Sun, W. T., Liu, H. L., & Pan, C. H. (2022). The effect of feeding on *briareum violacea* growth, survival and larval development under temperature and salinity stress. *Biology*, 11(3), 410. <https://doi.org/10.3390/biology11030410>
- Ebenezar, S., Singh, D. K., Sahoo, S., Prabu Linga, D., & Pal, A. K. (2023). *Outlook of Climate Change and Fish Nutrition*. Editors: Archana Sinha, Shivendra Kumar, Kavita Kumari. Springer, ISBN 978-981-19-5499-3, (eBook).
- Eissa, E. S. H., Ahmed, R. A., Abd Elghany, N. A., Elfeky, A., Saadony, S., Ahmed, N. H., Sakr, S. E. S., Dayrit, G. B., Tolenada, C. P. S., Atienza, A. A. C., Mabrok, M., & Ayoub, H. F. (2023). Potential symbiotic effects of β -1,3 glucan, and fructooligosaccharides on the growth performance, immune response, redox status, and resistance of pacific



white shrimp, *litopenaeus vannamei* to *Fusarium solani* infection. *Fishes*, 8(2), 105. <https://doi.org/10.3390/fishes8020105>

Elabd, H., Wang, H. P., Shaheen, A., Yao, H., & Abbass, A. (2016). Feeding *Glycyrrhiza glabra* (liquorice) and *Astragalus membranaceus* (AM) alters innate immune and physiological responses in yellow perch (*Perca flavescens*). *Fish & shellfish immunology*, 54, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.04.024>

El-Kady, A. A., Magouz, F. I., Mahmoud, S. A., & Abdel-Rahim, M. M. (2022). The effects of some commercial probiotics as water additive on water quality, fish performance, blood biochemical parameters, expression of growth and immune-related genes, and histology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 546, 737249. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737249>

FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*. FAO: Rome, Italy. ISBN 978-92-5-132692-3.

Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237–240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>

Fowles, T. M., & Nansen, C. (2020). Insect-based bioconversion: value from food waste. *Food waste management: solving the wicked problem*, 321–346. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20561-4_12

Froehlich, H. E., Jacobsen, N. S., Essington, T. E., Clavelle, T., & Halpern, B. S. (2018). Avoiding the ecological limits of forage fish for fed aquaculture. *Nature sustainability*, 1(6), 298–303. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0077-1>

Fuller, R. (1989). Probiotics in man and animals. *The Journal of applied bacteriology*, 66(5), 365–378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1989.tb05105.x>

Garcia-Launay, F., Dusart, L., Espagnol, S., Laisse-Redoux, S., Gaudre, D., Meda, B., & Wilfart, A., (2018). Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British journal nutrition*, 120, 1298–1309. <https://doi.org/10.1017/s0007114518002672>

Gardiner, G. E., Metzler-Zebeli, B. U., & Lawlor, P. G. (2020). Impact of intestinal microbiota on growth and feed efficiency in pigs: A review. *Microorganisms*, 8(12), 1886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121886>

Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P. P., De Angelis, A., ... & Roncarati, A. (2020). Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. *Italian journal of animal science*, 19(1), 360–372. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1743209>

Geda, F., Rekecki, A., Decostere, A., Bossier, P., Wuyts, B., Kalmar, I. D., & Janssens, G. P. J. (2012). Changes in intestinal morphology and amino acid catabolism in common carp at mildly elevated temperature as affected by dietary mannanoligosaccharides. *Animal feed science and technology*, 178(1–2), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.09.008>

Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Javahery, S., & Van Doan, H. (2022). Effects of dietary vitamin C, thyme essential oil, and quercetin on the immunological and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture*, 553, 738053. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738053>

Giannenas, I., Triantafyllou, E., Stavrakakis, S., Margaroni, M., Mavridis, S., Steiner, T., & Karagouni, E. (2012). Assessment of dietary supplementation with carvacrol or thymol containing feed additives on performance, intestinal microbiota and antioxidant status of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 350, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.027>

Glencross, B. D., Huyben, D., & Schrama, J. W. (2020). The application of single-cell ingredients in aquaculture feeds-a review. *Fishes*, 5(3), 22. <https://doi.org/10.3390/fishes5030022>

Godoy M. G., Amorim G. M., Barreto M. S., & Freire D. M. G. (2018). Chapter 12 – Agricultural Residues as Animal Feed: Protein Enrichment and Detoxification Using Solid-State Fermentation. In A. Pandey, C. Larroche, C. R. Soccol (eds.), *In Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 235–256). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00012-8>

- Groot, R., Lyons, P., & Schrama, J. W. (2021). Digestible energy versus net energy approaches in feed evaluation for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 274, 114893. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2021.114893>
- Guerreiro, I., Castro, C., Antunes, B., Coutinho, F., Rangel, F., Couto, A., ... & Enes, P. (2020). Catching black soldier fly for meagre: Growth, whole-body fatty acid profile and metabolic responses. *Aquaculture*, 516, 734613. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734613>
- Guillen, A. C., Borges, M. E., Herrerias, T., Kandalski, P. K., de Arruda Marins, E., Viana, D., ... & Donatti, L. (2019). Effect of gradual temperature increase on the carbohydrate energy metabolism responses of the antarctic fish *notothenia rossii*. *Marine environmental research*, 150, 104779. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104779>
- Hanachi, P., Karbalaee, S., Walker, T. R., Cole, M., & Hosseini, S. V. (2019). Abundance and properties of microplastics found in commercial fish meal and cultured common carp (*Cyprinus carpio*). *Environmental science and pollution research*, 26, 23777–23787. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05637-6>
- Herrera, M., Mancera, J. M., & Costas, B. (2019). The use of dietary additives in fish stress mitigation: comparative endocrine and physiological responses. *Frontiers in endocrinology*, 10, 447. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00447>
- Hilborn, R., Banobi, J., Hall, S. J., Pucylowski, T., & Walsworth, T. E. (2018). The environmental cost of animal source foods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(6), 329–335. <https://doi.org/10.1002/fee.1822>
- Howell, M. (2022). *An insider's view of advances in aquaculture nutrition*. 23 September 2022. <https://thefishsite.com/articles/an-insiders-view-of-advances-in-aquaculture-nutrition-alltech-coppens>
- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., ... & Strugnelli, J. M. (2019). The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. *One earth*, 1(3), 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>
- Huertas, I. E., Rouco, M., Lopez-Rodas, V., & Costas, E. (2011). Warming will affect phytoplankton differently: evidence through a mechanistic approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1724), 3534–3543. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0160>
- Huguet, C. T., Norambuena, F., Emery, J. A., Hermon, K., & Turchini, G. M. (2015). Dietary n-6/n-3 LC-PUFA ratio, temperature and time interactions on nutrients and fatty acids digestibility in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 436, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.11.011>
- Idenyi, J. N., Eya, J. C., Nwankwegu, A. S., & Nwoba, E. G. (2022). Aquaculture sustainability through alternative dietary ingredients: Microalgal value-added products. *Engineering microbiology*, 2(4), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2022.100049>
- Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current opinion in biotechnology*, 61, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026>
- Jusadi, D., Ekasari, J., Suprayudi, M. A., Setiawati, M., & Fauzi, I. A. (2021). Potential of underutilized marine organisms for aquaculture feeds. *Frontiers in marine science*, 7, 609471. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.609471>
- Khan, M. A., Das, S. K., & Bhakta, D. (2018). Food and feeding habits, gastro-somatic index and gonado-somatic index of *Scylla serrata* from Hooghly-Matlah estuary of West Bengal, India. *Journal of the marine biological association of india*, 60(1), 14. <https://doi.org/10.6024/jmbai.2018.60.1.1994-02>
- Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., & Corraze, G. (2018). Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression. *PLoS One*, 13(1), e0190730. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190730>
- Legrand, T. P., Wynne, J. W., Weyrich, L. S., & Oxley, A. P. (2020). A microbial sea of possibilities: current knowledge and prospects for an improved understanding of the fish microbiome. *Reviews in aquaculture*, 12(2), 1101–1134. <https://doi.org/10.1111/raq.12375>



- Li, Y., Kortner, T. M., Chikwati, E. M., Belghit, I., Lock, E. J., & Krogdahl, Å. (2020). Total replacement of fish meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal does not compromise the gut health of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 520, 734967. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734967>
- Lock, E. J., Biancarosa, I., & Gasco, L. (2018). Insects as raw materials in compound feed for aquaculture. *Edible insects in sustainable food systems*, 263–276. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9_16
- Ma, M., & Hu, Q. (2024). Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: prospects and challenges. *Reviews in aquaculture*, 16(2), 818–835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>
- Mackenzie, S. G., Leinonen, I., Ferguson, N., & Kyriazakis, I. (2016). Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact in diet formulation. *British journal of nutrition*, 115(10), 1860–1874. <https://doi.org/10.1017/S0007114516000763>
- MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific reports*, 10(1), 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>
- Mancuso, T., Pippinato, L., & Gasco, L. (2019). The European insects sector and its role in the provision of green proteins in feed supply. *Calitatea*, 20(S2), 374–381. <https://www.researchgate.net/publication/332504133>
- Matassa, S., Papirio, S., Pikaar, I., Hülsen, T., Leijenhorst, E., Esposito, G., ... & Verstraete, W. (2020). Upcycling of biowaste carbon and nutrients in line with consumer confidence: the “full gas” route to single cell protein. *Green chemistry*, 22(15), 4912–4929. <https://doi.org/10.1039/D0GC01382J>
- Messeder, T. (2021). *Innovation opportunities in European Aquaculture*. KTN AgriFood and EIT Food. March 2021.
- Mo, W. Y., Cheng, Z., Choi, W. M., Man, Y. B., Liu, Y., & Wong, M. H. (2014). Application of food waste-based diets in polyculture of low trophic level fish: Effects on fish growth, water quality and plankton density. *Marine pollution bulletin*, 85(2), 803–809. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.020>
- Nadermann, N., Seward, R. K., & Volkoff, H. (2019). Effects of potential climate change-induced environmental modifications on food intake and the expression of appetite regulators in goldfish. *Comparative biochemistry and physiology part a: molecular & integrative physiology*, 235, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.06.001>
- Nagappan, S., Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., ... & Kumar, G. (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of biotechnology*, 341, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- Nasser, N., Abiad, M. G., Babikian, J., Monzer, S., & Saoud, I. P. (2018). Using restaurant food waste as feed for Nile tilapia production. *Aquaculture research*, 49(9), 3142–3150. <https://doi.org/10.1111/are.13777>
- Nathanailides, C., Kolygas, M., Choremi, K., Mavraganis, T., Gouva, E., Vidalis, K., & Athanassopoulou, F. (2021). Probiotics Have the Potential to Significantly Mitigate the Environmental Impact of Freshwater Fish Farms. *Fishes*, 6(4), 76. <https://doi.org/10.3390/fishes6040076>
- Nielsen, T. B., Würtz, A. M. L., Tjønneland, A., Overvad, K., & Dahm, C. C. (2022). Substitution of unprocessed and processed red meat with poultry or fish and total and cause-specific mortality. *British Journal of Nutrition*, 127(4), 563–569. <https://doi.org/10.1017/S0007114521001252>
- NOAA Fisheries. (2022). *Climate Resilience and Aquaculture. Fact Sheet 2022*. www.fisheries.noaa.gov/aquaculture
- Ojeda, J. (2021). *Can sustainable aquaculture help to achieve the UN SDGs?* 17 August, 2021. <https://www.eitfood.eu/blog/can-sustainable-aquaculture-help-to-achieve-the-un-sdgs>
- Onomu, A. J., & Okuthe, G. E. (2024). The Role of Functional Feed Additives in Enhancing Aquaculture Sustainability. *Fishes*, 9(5), 167. <https://doi.org/10.3390/fishes9050167>
- Oscar, E. V., Joshua, E. O., Felix, E., & Eyerituvie, A. F. (2020). A Review on the Application and Benefits of Probiotics Supplements in Fish Culture. *Oceanography & Fisheries Open Access Journal*, 11(4), 62–65. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2020.11.555817>



- Parker, L. M., Scanes, E., O'Connor, W. A., Dove, M., Elizur, A., Pörtner, H. O., & Ross, P. M. (2024). Resilience against the impacts of climate change in an ecologically and economically significant native oyster. *Marine pollution bulletin*, 198, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115788>
- Pombo, A., Baptista, T., Granada, L., Ferreira, S. M., Gonçalves, S. C., Anjos, C., ... & Costa, J. L. (2020). Insight into aquaculture's potential of marine annelid worms and ecological concerns: a review. *Reviews in aquaculture*, 12(1), 107–121. <https://doi.org/10.1111/raq.12307>
- Porteus, C. S., Hubbard, P. C., Uren Webster, T. M., van Aerle, R., Canário, A. V., Santos, E. M., & Wilson, R. W. (2018). Near-future CO₂ levels impair the olfactory system of a marine fish. *Nature climate change*, 8(8), 737–743. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0224-8>
- Puvanasundram, P., Chong, C. M., Sabri, S., Yusoff, M. S., & Karim, M. (2021). Multi-strain probiotics: Functions, effectiveness and formulations for aquaculture applications. *Aquaculture reports*, 21, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100905>
- Qiu, X., Neori, A., Kim, J. K., Yarish, C., Shpigel, M., Guttman, L., ... & Davis, D. A. (2018). Evaluation of green seaweed *Ulva* sp. as a replacement of fish meal in plant-based practical diets for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Journal of applied phycology*, 30, 1305–1316. <https://www.researchgate.net/publication/320042463>
- Ragaza, J. A., Hossain, M. S., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., Kotzamanis, Y., ... & Kumar, V. (2021). Brown seaweed (*Sargassum fulvellum*) inclusion in diets with fishmeal partially replaced with soy protein concentrate for Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) juveniles. *Aquaculture nutrition*, 27(4), 1052–1064. <https://doi.org/10.1111/anu.13246>
- Rasidi, R., Jusadi, D., Setiawati, M., Yuhana, M., Zairin Jr, M., & Sugama, K. (2021). Dietary Supplementation of humic acid in the Feed of juvenile asian seabass, *Lates calcarifer* to counteract possible negative effects of Cadmium Accumulation on Growth and Fish Well-being when Green Mussel (*Perna viridis*) is used as a Feed ingredient. *Aquaculture research*, 52(6), 2550–2568. <https://doi.org/10.1111/are.15104>
- Reid, G. K., Gurney-Smith, H., Marcogliese, D. J., Knowler, D., Benfey, T., Garber, A. F., Forster, I., Chopin, T., Brewer-Dalton, K., Moccia, R. D., Flaherty, M. S., Smith, C. T., de Silva, S. (2019). Climate change and aquaculture: considering biological response and resources. *Aquaculture environment interactions*, 11, 569–602. <https://doi.org/10.3354/aei00332>
- Rimoldi, S., Torrecillas, S., Montero, D., Gini, E., Makol, A., Valdenegro, V. V. et al. (2020). Assessment of dietary supplementation with galactomannan oligosaccharides and phytogenics on gut microbiota of European sea bass (*Dicentrarchus Labrax*) fed low fishmeal and fish oil based diet. *PLoS ONE* 15(4), e0231494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231494>
- Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein – state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>
- Sandblom, E., Gräns, A., Axelsson, M., & Seth, H. (2014). Temperature acclimation rate of aerobic scope and feeding metabolism in fishes: implications in a thermally extreme future. *Proceedings of the royal society b: biological sciences*, 281(1794), 20141490. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1490>
- Sarker, P. K. (2023). Microorganisms in fish feeds, technological innovations, and key strategies for sustainable aquaculture. *Microorganisms*, 11(2), 439. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020439>
- Sarker, P. K., Fournier, J., Boucher, E., Proulx, E., de la Noüe, J., & Vandenberg, G. W. (2011). Effects of low phosphorus ingredient combinations on weight gain, apparent digestibility coefficients, non-fecal phosphorus excretion, phosphorus retention and loading of large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 168, 241–9. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.086>
- Sarker, P. K., Kapuscinski, A. R., McKuin, B., Fitzgerald, D. S., Nash, H. M., & Greenwood, C. (2020). Microalgae-blend tilapia feed eliminates fishmeal and fish oil, improves growth, and is cost viable. *Scientific reports*, 10(1), 19328. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75289-x>
- Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., Tomas, S., Koceva Komlenić, D., & Bucić-Kojić, A. (2021). A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation. *Foods*, 10(5), 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>



- Sepulveda, J., & Moeller, A. H. (2020). The effects of temperature on animal gut microbiomes. *Frontiers in microbiology*, 11, 384. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00384>
- Shahin, S., Okomoda, V. T., Ma, H., & Ikhwanuddin, M. (2023). Sustainable alternative feed for aquaculture: state of the art and future perspective. *Planetary sustainability*, 1(1), 62–96. <https://www.researchgate.net/publication/373874626>
- Sharma, J., Singh, S. P., & Chakrabarti, R. (2017). Effect of temperature on digestive physiology, immune-modulatory parameters, and expression level of Hsp and LDH genes in *Catla catla* (Hamilton, 1822). *Aquaculture*, 479, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.05.031>
- Siikavuopio, S.I., James, P., Lysne, H., & Saather, B. J. (2012). Effects of size and temperature on growth and feed conversion of juvenile green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*). *Aquaculture*, 354–355, 27–30. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.036>
- Smáráson, B. Ö. (2023). *Why are sustainable feed need? Eit Food*. 01.07.2023. <https://www.eitfood.eu/blog/fish-feed-why-we-need-sustainable-alternatives>
- Stumpp, M., Hu, M., Casties, I., Saborowski, R., Bleich, M., Melzner, F., & Dupont, S. (2013). Digestion in sea urchin larvae impaired under ocean acidification. *Nature climate change*, 3(12), 1044–1049. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2028>
- Tait, J. (2021). *New approach to feed production can transform climate impact of industries including fish farming*. <https://www.sps.ed.ac.uk/news-events/news/new-approach-feed-production-can-transform-climate-impact-industries-including>
- Tocher, D. R., Betancor, M. B., Sprague, M., Olsen, R. E., & Napier, J. A. (2019). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: Bridging the gap between supply and demand. *Nutrients*, 11(1), 89. <https://doi.org/10.3390/nu11010089>
- Trinh, L. T., Bakke, I., & Vadstein, O. (2017). Correlations of age and growth rate with microbiota composition in Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae. *Scientific reports*, 7(1), 8611. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09073-9>
- Van Doan, H., Hoseinifar, S. H., Tapingkae, W., Seel-Audom, M., Jaturasitha, S., Dawood, M. A., & Esteban, M. Á. (2020). Boosted growth performance, mucosal and serum immunity, and disease resistance Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings using corn-cob-derived xylooligosaccharide and *Lactobacillus plantarum* CR1T5. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 12, 400–411. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100953>
- Vieira, L., Filipe, D., Amaral, D., Magalhães, R., Martins, N., Ferreira, M., ... & Peres, H. (2023). Solid-state fermentation as green technology to improve the use of plant feedstuffs as ingredients in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Animals*, 13(17), 2692. <https://doi.org/10.3390/ani13172692>
- Volkoff, H. (2019). Feeding and its regulation. In *Climate change and non-infectious fish disorders* (pp. 87–101). Wallingford UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786393982.0087>
- Warwas, N. (2023). *Novel Marine Ingredients for Aquaculture - Fish Nutrition, Physiology and Intestinal Health*. Doctoral thesis, University of Gothenburg Faculty of Science, Department of Biological and Environmental Sciences. Institutionen för biologi och miljövetenskap. ISBN 978-91-8069-513-8 978-91-8069-514-5
- Widanarni, W., Taufik, A., Yuhana, M., & Ekasari, J. (2019). Dietary mannan ligosaccharides positively affect the growth, digestive enzyme activity, immunity and resistance against *Vibrio harveyi* of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) larvae. *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences*, 19, 271–278. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_4_01
- Wilfart, A., Garcia-Launay, F., Terrier, F., Soudé, E., Aguirre, P., & Skiba-Cassy, S. (2023). A step towards sustainable aquaculture: Multiobjective feed formulation reduces environmental impacts at feed and farm levels for rainbow trout. *Aquaculture*, 562, 738826.
- Yadav, S., & Jha, R. (2019). Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *Journal of animal science and biotechnology*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0310-9>



Yousefi, M., Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Rashidian, G., & Van Doan, H. (2021). Effects of dietary marjoram, *Origanum majorana* extract on growth performance, hematological, antioxidant, humoral and mucosal immune responses, and resistance of common carp, *Cyprinus carpio* against *Aeromonas hydrophila*. *Fish & shellfish immunology*, 108, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.11.019>

Zengin, M., Sur, A., İlhan, Z., Azman, M. A., Tavşanlı, H., Esen, S., Bacaksız, O. K., Demir, E. (2022). Effects of fermented distillers grains with solubles, partially replaced with soybean meal, on performance, blood parameters, meat quality, intestinal flora, and immune response in broiler. *Research in veterinary science*, 150, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.06.027>

Zhang, Z., Liu, H., Jin, J., Zhu, X., Han, D., & Xie, S. (2024). Towards a low-carbon footprint: Current status and prospects for aquaculture. *Water biology and security*, 3, 1–15, 100290. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100290>

Ziv-Douki, H. (2020). Combining strengths for greater impact. *Cargill aqua nutrition sustainability report 2020. Healthy seafood for future generations*. <https://www.cargill.com/doc/1432196768685/cargill-aqua-nutrition-sustainability-report-2020.pdf>



Розділ 5. Вплив глобального потепління на захворювання в аквакультурі та захисні заходи

**Доцент, доктор наук Гражина Жибієна
Алвідас Жибас, керівник Центру аквакультури
Університет Витатаса Магнуса**

Вступ

Зміна клімату триває і впливає на водне середовище (прісноводні, морські або солонуваті екосистеми) шляхом підвищення температури води, зміни рівня води та режиму течії, евтрофікації, підкислення, зміни вмісту поживних речовин, збільшення проникнення ультрафіолетового (УФ) випромінювання, зменшення ареалу та деградації, а також збільшення теплового стресу та поширення видів.

Зміни у водних середовищах, такі як температура, солоність та хронічний стрес від низького рівня розчиненого кисню, впливають на слизові бар'єри, епітелій, імунні клітини та внутрішнє середовище (тобто рідини організму, клітини, тканини та органи) водних організмів. Це призводить до зниження імунокомпетентності водних організмів, поганого росту та зниження репродуктивної здатності.

Зміна клімату, що включає глобальне потепління, також може негативно вплинути на енергетичні запаси риб, сприяючи збільшенню окислювального стресу та зниженню теплової толерантності (Woo & Iwama, 2019).

За оцінками, щоб людство могло підтримувати споживання морепродуктів на поточному рівні, до 2030 року аквакультура повинна виробляти понад 80 мільйонів тонн (т), щоб зберегти поточний рівень споживання на душу населення. Таким чином, аквакультура повинна буде виробляти додаткові 30 мільйонів тонн морепродуктів менш ніж за півтора десятиліття. Ймовірно, для цього не вистачить землі або придатних морських територій без масштабних порушень багатьох екосистем. Однак близько 40 % всієї продукції аквакультури втрачається через хвороби, як це широко визначено нижче. Отже, просто усунувши або обмеживши вплив хвороб, людство могло б майже задовольнити потреби в морепродуктах, не змінюючи жодних практик використання землі (Lucas et al., 2019).

Прогнозується, що до 2030 року середня глобальна температура повітря підвищиться на 0,5–1,5 °C, а наслідки цього явища будуть посилюватися після перевищення глобального підвищення температури на 1–2 °C. Прогнозується, що до 2100 року температура верхнього шару океану на глибині 100 м підвищиться на 0,6–2,0 °C. Теплове розширення води океану, що нагрівається, та танення льодовикових щитів і льодовиків, швидше за все, спричинять підвищення середнього рівня моря на 10–35 см до 2050 року. Зміна клімату також призвела до збільшення частоти екстремальних погодних явищ, таких як шторми та посухи. До 2050 року



витрати, пов'язані з екстремальними погодними явищами, можуть досягти 1% світового ВВП на рік. Близько 20–35% викидів CO₂ поглинаються океанами, що призводить до їхнього закислення.

Глобальне потепління збільшує поширеність та інтенсивність захворювань. Підвищена температура води може сприяти зростанню та розмноженню патогенів, що призводить до частіших і більш серйозних спалахів захворювань в аквакультурі. Вища температура води прискорює життєвий цикл багатьох водних патогенів, збільшуючи їх поширеність та вірулентність. Бактерії, віруси та паразити можуть стати більш агресивними або розвинути резистентність до лікування. Багато видів аквакультури мають вузький діапазон термотолерантності. Підвищена температура може послабити їх імунну систему, зробивши їх більш вразливими до інфекцій та захворювань. Тепліша вода може дозволити тропічним та субтропічним патогенам розширити свій ареал, піддаючи види аквакультури в помірних регіонах новим захворюванням.

Зміна клімату загрожує унікальним і вразливим екосистемам, таким як коралові рифи. У наземних і прісноводних екосистемах зміна клімату призводить до втрати біорізноманіття та посилення колонізації інвазивними видами. Сукупний вплив підвищення рівня моря, берегової ерозії, забруднення та підкислення океану загрожує прибережним екосистемам (Lucas et al., 2019).

Наслідки зміни клімату для аквакультури в майбутньому є глибокими. Оскільки зміна клімату призводить до збільшення частоти посух та екстремальних погодних умов, можна очікувати перебоїв у виробництві на ставках. Крім того, зниження врожайності та збільшення попиту, пов'язане із зростанням населення та економічним зростанням, спричинить дефіцит та підвищення цін на товарні культури, що використовуються для виробництва кормів для аквакультури. Підвищення рівня моря та екстремальні погодні умови збільшать вразливість аквакультури в прибережній зоні, включаючи прибережні ставки для вирощування креветок і риби, плоти для вирощування молюсків та рибні садки, особливо в Азії, де розвинена інфраструктура аквакультури.

Закислення океану поставить під загрозу стійкість прибережної аквакультури двостулкових молюсків. Глобальні зміни клімату, ймовірно, погіршать вразливість аквакультури до захворювань (Lucas et al., 2019).

Підвищення рівня CO₂ призводить до окислення океану, що впливає на кальцифікуючі організми, такі як молюски та корали. Кислі умови послаблюють їхні мушлі та скелети, роблячи їх більш вразливими до хвороб та екологічного стресу. Окислення може змінити склад та стан водних екосистем, що потенційно вплине на види, які залежать від цих середовищ існування, включаючи ті, що вирощуються в системах аквакультури.

Глобальне потепління може спричинити зміни солоності через зміну режиму опадів та збільшення стоку прісної води. Види, що вирощуються в аквакультурі, можуть зазнавати осмотичного стресу, що призводить до підвищення сприйнятливості до захворювань та зниження темпів росту. Коливання солоності можуть впливати на поширеність певних збудників та захворювань, що вимагає коригування методів управління.



Через глобальне потепління збільшення стоку поживних речовин із сільськогосподарських та міських територій може призвести до евтрофікації, що спричиняє цвітіння водоростей та гіпоксичні умови. Ці зміни погіршують якість води та створюють середовище, сприятливе для спалахів захворювань.

Глобальне потепління може спричинити шкідливе цвітіння водоростей (НАВ). Деякі види водоростей виробляють токсини, які можуть безпосередньо шкодити аквакультурним видам або створювати умови, сприятливі для патогенних організмів.

Екстремальні погодні явища, такі як шторми та повені, можуть спричинити фізичні пошкодження інфраструктури аквакультури та призвести до раптових змін якості води. Ці стресові фактори можуть послабити здоров'я водних видів та підвищити їх вразливість до захворювань.

Глобальне потепління може змінити розподіл і різноманітність водних патогенів. Нові або раніше рідкісні патогени можуть стати більш поширеними, що створить нові виклики для боротьби з хворобами в аквакультурі.

Інші наслідки зміни клімату, такі як гіпоксія, підкислення та зміни солоності, можуть посилити стрес і ще більше погіршити імунну функцію.

Глобальне потепління може змінити життєві цикли та взаємодію між хазяїнами та паразитами, що потенційно може призвести до появи нових переносників захворювань та шляхів їх передачі. Щоб адаптуватися до мінливого середовища патогенів, аквакультурні підприємства повинні впровадити оновлені стратегії моніторингу та боротьби із захворюваннями.

1. Поширені захворювання та їх наслідки

1.1. Класифікація та основні симптоми

Вступ до захворювань аквакультури

Хвороба — це реакція організму на несприятливі фактори зовнішнього середовища. В результаті порушується нормальне функціонування організму і знижується його здатність до адаптації. Водночас мобілізуються захисні функції організму.

Хвороби характеризуються певними клінічними явищами, симптомами, відповідними ушкодженнями структури тканин організму та порушеннями їх функцій.

Три кільця Снейзко, діаграма Венна взаємодій між хазяїном (видом аквакультури), збудником і середовищем (рис. 5.1), ілюструють той факт, що для виникнення більшості інфекційних захворювань необхідна тристороння взаємодія, яка включає всі компоненти:

- збудник;
- хазяїн;
- середовище.

Неінфекційне захворювання є взаємодією лише між хазяїном і середовищем. Область перетину між збудником і хазяїном представляє обов'язкові збудники: найбільш небезпечну

групу, оскільки вони не потребують стресу навколишнього середовища для викликання клінічного захворювання (Lucas et al., 2019).

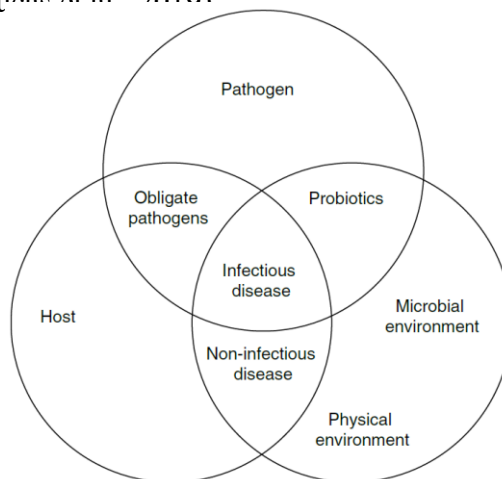


Рисунок 5.1. Модифікована трикільцева модель Снейзко, що зображає взаємодію між хазяїном, патогеном та навколишнім середовищем (Lucas et al., 2019).

Поведінкові та фізичні відхилення

Аномальна поведінка часто є першою ознакою наближення проблем зі здоров'ям риб. Фахівці повинні бути добре обізнані з очікуваною поведінкою та зовнішнім виглядом різних видів риб. Необхідно ретельно спостерігати за всією поведінкою риб, включаючи годування, плавання та реакцію на раптові рухи. Виробник риби повинен навчитися розрізняти нюанси в поведінці. Здорові риби демонструють «нормальну» поведінку. У таблиці 5.1 перелічено аномалії, які можна спостерігати, коли риба хвора. Ці ознаки допоможуть діагностувати причину проблеми (Timmons & Ebeling, 2013).

Таблиця 5.1. Поведінкові та фізичні ознаки стресу та захворювання у риб (Тіммонс і Ебелінг, 2013)

Таблиця 1. Поведінкові та фізичні ознаки стресу та хвороби риб (Timmons & Ebeling, 2013)

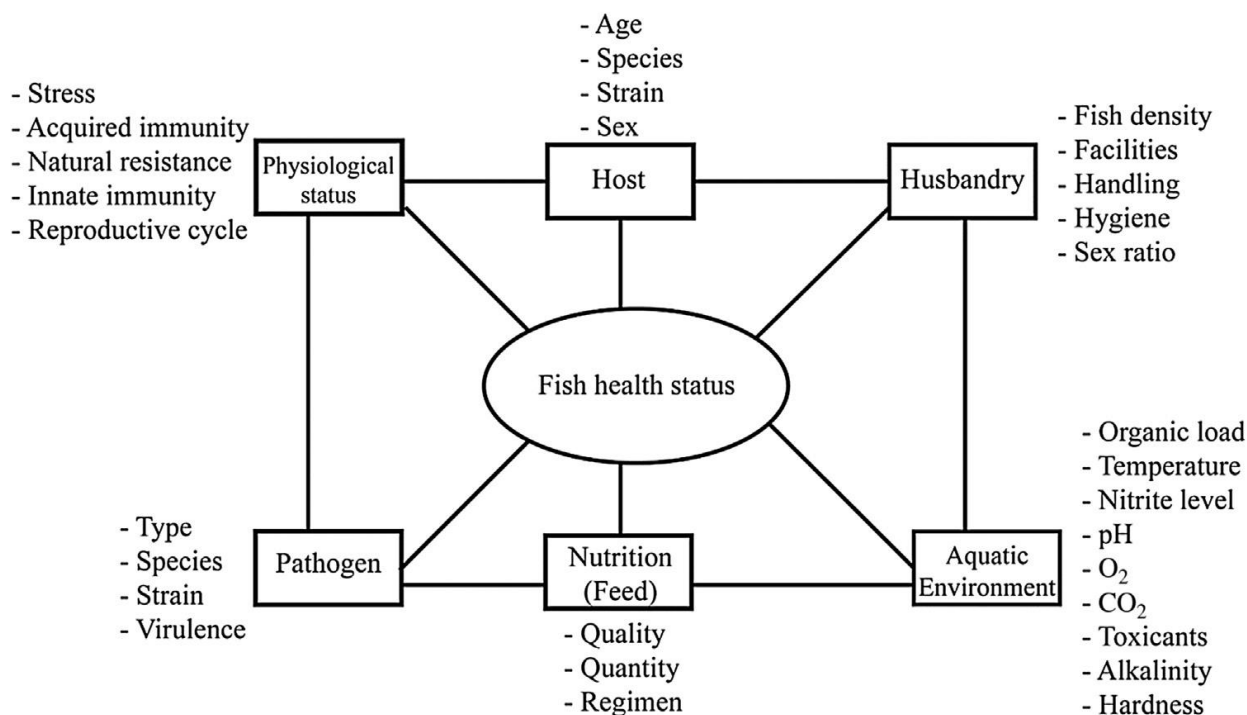
Поведінка риби	Ознаки для спостереження
Рухи	Слабке, нестабільне або мляве плавання Підвищена або знижена реакція на зовнішні подразники, такі як шум або рух Дряпання, блимання або тертя об стінки або дно резервуара Стінки або дно Смикання, кидки, обертання або вистрибування з води Скупчення людей біля джерела водопостачання Плавання догори ногами Задишка біля поверхні води
Годування	Не годувати Зменшене годування (визначається за кривими росту та спостереженнями)
Дихання	Зменшення швидкості рухів в окологрудинному просторі Підвищена швидкість рухів в окологрудинному просторі
Фізичний стан	Видимі пошкодження або виразки



	Каламутні очі Вирячені очі Зябра набряклі, білі, рожеві або блідо-червоні, ерозовані, набряклі, криваві, коричневі Втрата луски Роздутий живіт Надлишок слизу на шкірі та/або зябрах (також перевірте, чи немає надлишку слизу на екранах акваріума) Плями або грибок на шкірі Незвичайні забарвлення на поверхні тіла, в тому числі червоні набряклі ділянки, сірі або жовті ураження Роздуті оперкули (зяброві кришки) Потерті плавники або хвіст Бульбашки в очах або на шкірі
--	---

Риба, яку вирощують в системах аквакультури, стикається з різними типами стресів, які можна умовно поділити на абіотичні та біотичні. Вплив абіотичних стресорів на вирощуваних риб дуже важко оцінити (Рис. 2). Деякі з біотичних факторів можна легко контролювати, і обережне маніпулювання певними біотичними факторами може успішно запобігти або, принаймні, мінімізувати втрати від хвороб в аквакультурі (Jeney, 2017).

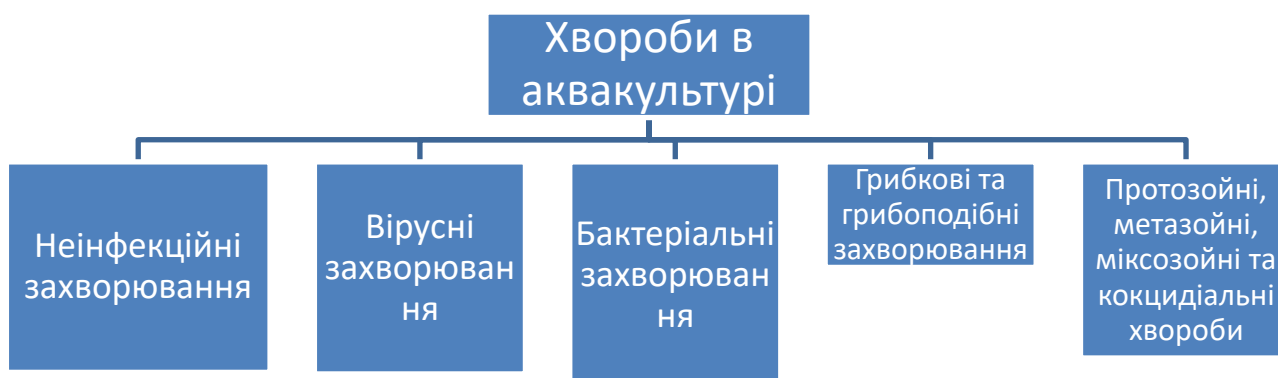
Figure 2. Factors affecting the health status of fish (Jeney, 2017)



Класифікація хвороб в аквакультурі

Хвороби в аквакультурі можна розділити на кілька груп: неінфекційні хвороби, вірусні хвороби, бактеріальні хвороби, хвороби, спричинені грибами та грибоподібними організмами, і хвороби, спричинені паразитами (найпростіші, метазоа, міксоzoа, кокцидії тощо) (Рисунок 3).

Рисунок 3. Класифікація хвороб в аквакультурі





Детальну інформацію про хвороби, етіологію, симптоми, фактори ризику, лікування та профілактику можна знайти, наприклад, у спеціалізованих джерелах, книгах, базах даних:

- Клінічне керівництво з рибної медицини. (2021). В електронних книгах Wiley;
- Noga, E. J. (2010). Хвороби риб: діагностика та лікування. John Wiley & Sons.
- <http://afs-fhs.org/bluebook/bluebook-index.php> Розділ «Здоров'я риб» СИНЯ КНИГА 2014 року видання. Запропоновані процедури для виявлення та ідентифікації певних патогенних мікроорганізмів пелагічних риб та молюсків.
- <http://www.thefishsite.com/diseaseinfo/>
- https://www.dnr.state.mn.us/fish_diseases/index.html.

Приклади поширених зовнішніх або внутрішніх уражень, що вказують на захворювання у вирощуваної риби, наведені у таблицях 2 і 3.

Неінфекційні захворювання

Неінфекційні захворювання пов'язані з якістю води (низький вміст розчиненого кисню, перенасичення газами, баротравми, температурний стрес, стрес рН та токсичність аміаку, нітритів, нітратів, хлору, важких металів, сірководню, пестицидів тощо) або іншими причинами.) або інших причин (травми, екстенсивна міопатія, депігментація бічних ліній, гіперплазія щитовидної залози, кісти мукометри та яєчників, затримка або зв'язування ікри, дистопія, катаракта, ліпідна кератопатія, дефіцит мікроелементів, сторонні тіла шлунково-кишкового тракту та новоутворення (Клінічний посібник з рибної медицини, 2021).

1.2. Вірусні захворювання

Більшість відомих вірусних збудників риб належать до трьох родин:

- Herpesviridae, Rhabdoviridae та Iridoviridae.

Наступні вірусні захворювання риб є найбільш небезпечними та підлягають повідомленню до МЕБ (Всесвітньої організації охорони здоров'я тварин), регіональних та національних організацій, відповідальних за захворювання тварин (Клінічний довідник з медицини риб, 2021):

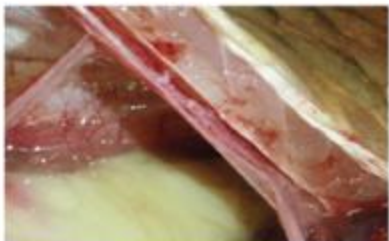
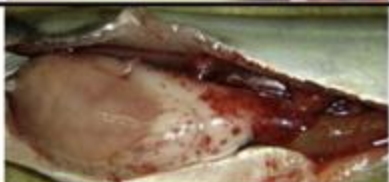
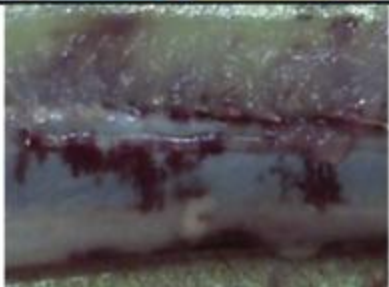
- вірус герпесу кої
- вірусна геморагічна септицемія
- інфекційний гематопоеетичний некроз
- весняна віремія коропа
- епізоотичний гематопоеетичний некроз
- іридовірус червоного морського ляща
- інфекційна анемія лосося
- альфавірус лососевих.

Таблиця 5.2 Приклади поширених зовнішніх уражень, що вказують на захворювання у вирощеної риби (Jeney, 2017)

Abnormal Signs	Possible Disease Causes
	Multifocal to coalescing hemorrhage suggestive of a systemic viral and/or bacterial infection, or heavy external parasitism
	Diffuse hemorrhages, along with a hemorrhagic vent, suggestive of a systemic subacute viral and/or bacterial infection
	Furuncle suggestive of infection with <i>Aeromonas salmonicida</i>
	Deep hemorrhagic ulcer suggestive of bacterial infection
	Fin erosion and deep ulcer on the caudal peduncle suggestive of flavobacterial infection
	Exophthalmia with an ocular hemorrhage suggestive of a systemic viral and/or bacterial infection
	Severely pale gills suggestive of anemia, possibly induced by viral or bacterial infection
	Gills showing extensive tissue loss suggestive of flavobacterial infection and some viral infections (e.g., Koi herpesvirus)

Таблиця 5.3 Приклади поширених внутрішніх уражень, що вказують на захворювання у вирощеної риби (Jeney, 2017)



Abnormal Signs	Possible Disease Causes
	Presence of fluids in the abdominal cavity suggestive of a systemic bacterial and/or viral disease
	Hemorrhage in visceral fat suggestive of nutritional deficiency or systemic viral/bacterial disease
	Multiple whitish nodules in the liver suggestive of granulomatous diseases, such as mycobacteriosis, bacterial kidney disease, or piscirickettsiosis. The same lesions can be caused by encysted metacercariae or larval trematodes
	Hemorrhagic inflammation of the intestine suggestive of toxicosis or enteric redmouth disease caused by <i>Yersinia ruckeri</i>
	Hemorrhages in the swimbladder suggestive of systemic viral and/or bacterial disease
	Whitish nodules in the kidney parenchyma suggestive of bacterial kidney disease



Бактеріальні захворювання

Більшість бактеріальних захворювань риб викликаються умовно-патогенними грамнегативними паличками (паличками).

Повідомляється про деякі значні грампозитивні бактеріальні інфекції (наприклад, *Streptococcus* і *Renibacterium* spp.; *Mycobacterium* spp. також можуть забарвлюватися за Грамом).

Захворюваність і смертність часто є вторинними по відношенню до стресових факторів. Найбільш поширені системні інфекції, хоча можуть спостерігатися і місцеві інфекції. Клінічні ознаки часто неспецифічні, і для остаточного діагнозу потрібні додаткові дослідження. Лікування антибіотиками повинно базуватися на результатах посіву та чутливості.

(Клінічний посібник з рибної медицини, 2021)

Грибкові та грибово-подібні захворювання

Риби сприйнятливі до різноманітних грибкових та грибоподібних захворювань. Найпоширенішими грибковими патогенами є ооміцети, екзофіали, фузарії, мікроспориди та мезоміцети.

- Оомікота (сапролегніоз)
- Оомікоти, широко відомі як ооміцети або водні плісняви, - це грибоподібні організми, які можуть вражати шкіру або зябра риб, риб'ячу ікру та будь-які речовини, що гниють.
- Вони є поширеними умовно-патогенними мікроорганізмами прісноводних і солонуватих риб і становлять особливу проблему для сомів в аквакультурі.
- Зараження часто є вторинним внаслідок травми або температурного стресу.
- Типові ооміцети піддаються лікуванню за допомогою медичних та господарських заходів, хоча рецидиви є поширеним явищем.
- Атипові ооміцети є більш інвазивними і призводять до важкого хронічного запалення.
- *Aphanomyces invadans* - атиповий ооміцет, який може викликати сезонні епізоотії у диких і вирощуваних прісноводних і солонуватих риб.

Протозойні, метазойні, міксозойні та кокцидіальні хвороби

Ichthyophthirius multifiliis - війчастий найпростіший ектопаразит, який вражає шкіру та зябра прісноводних кісткових риб. Захворювання часто називають прісноводним іхтіозом або білою плямистістю.

Метазоа - багатоклітинні еукаріотичні організми. Моногенії - плоскі черви (сисуни), які є поширеними ектопаразитами риб. Капсаліди - великі, овальні, яйцеживородні моногенії. Вони вражають шкіру, очі та зябра морських риб. П'явки - гематофаги, метазойні паразити. Їх часто можна побачити на шкірі, плавниках.

Міксозойди є поширеними паразитами дикорослих риб та ставкової аквакультури. Більшість цих паразитів мають непрямий життєвий цикл, зазвичай за участю олігохети, поліхети або моховатки.



1.3. Основні хвороби молюсків, ракоподібних

У всьому світі найпростіші паразити є найбільш значною причиною збитків для індустрії двостулкових молюсків. Це переважання найпростіших паразитів відображено в довіднику хвороб для фермерів, які вирощують молюсків (Elston, 1990). З 11 «найпоширеніших хвороб устриць», описаних у цьому довіднику, сім викликаються найпростішими:

- Perkinsus marina;
- Haplosporidium nelson;
- Haplosporidium costalis;
- Bonamia mackini;
- Bonamia ostrea;
- Marteilia refringens; і
- Hexamita nelson.

Хвороби молюсків викликають не лише найпростіші, але й віруси та бактерії. Віруси спричиняють смертність в інкубаторах і значні проблеми з вирощуванням морських креветок. Найбільш руйнівним вірусом, відомим на сьогоднішній день, є вірус синдрому білої плямистості (WSSV) (Lucas et al. (2019)).

1.4. Поширення патогенів в аквакультурі

Поширення патогенних мікроорганізмів залежить від щільності популяції, а отже, на нього впливають норми зариблення. Існує така залежність: чим більша щільність, тим менша відстань між сусідами. Це призводить до більшої ймовірності того, що патогени перетинають відстань між хазяїнами у життєздатному стані.

Нерухомі патогени, такі як віруси, нерухомі бактерії, спороносні гриби та яйця паразитів, в основному підпорядковуються законам дифузії, і тому в умовах стоячої води навколо інфікованої особини буде формуватися градієнт концентрації патогенів.

Інші патогени, такі як бактерії, зооспори грибів, найпростіші та метазої, як правило, мають активну, але різну здатність до розсіювання. Зі збільшенням відстані все менше патогенів зможуть досягти сприйнятливих хазяїв, щоб створити або продовжити епідемію (спалах) хвороби. Оскільки в навколишньому середовищі відбувається природне вимирання патогенів, якщо патоген не потрапляє до сприйнятливого хазяїна протягом певного періоду часу, ймовірність виникнення нової інфекції майже дорівнює нулю (Lucas et al. (2019)).

Заселяючи водойми монокультурами, аквакультура виключає як хижаків, так і конкурентів виду, що вирощується. Виключається також велика кількість об'єктів здобичі вирощуваних видів. Виключення тварин-сусідів призводить до виключення проміжних та остаточних хазяїв з екосистеми аквакультури. Це ефективно перериває життєвий цикл багатьох гельмінтів, що мають багато хазяїв (наприклад, дигеней та цестод), які, відповідно, відіграють меншу роль у виникненні захворювань в аквакультурі, ніж

у диких популяціях. Морські вольєри набагато менш ефективні в розриві цих життєвих циклів, ніж ставки або системи рециркуляції (Lucas et al. (2019)).



Глобальне потепління може змінити розподіл і поширеність патогенів, змінюючи умови навколишнього середовища і порушуючи екосистеми. Можуть з'явитися нові патогени або раніше рідкісні патогени можуть стати більш поширеними. Види аквакультури можуть зіткнутися з новими або більш агресивними патогенами, до яких вони не пристосовані, що збільшує ризик спалахів хвороб і ускладнює зусилля з управління.

Методи лікування хвороб риб

Різні методи лікування та застосування препаратів контролюють хвороби риб, як описано в (Parker, R. (2011).

Занурення. У методі занурення використовується міцний розчин хімікату протягом відносно короткого часу. Цей метод може бути небезпечним, оскільки використовуються концентровані розчини. Різниця між ефективною дозою і смертельною зазвичай дуже незначна. Рибу зазвичай поміщають у сітку і занурюють у міцний розчин хімікату на короткий час, зазвичай від 15 до 45 секунд, залежно від типу хімікату, концентрації та виду риби, яку обробляють.

Промивання. Цей метод досить простий і полягає в додаванні базового розчину хімікату у верхній кінець пристрою, що підлягає обробці, після чого він промивається через пристрій. Необхідно забезпечити достатній потік води, щоб хімікат можна було промити через пристрій або систему за короткий час. Цей метод не можна використовувати у водоймах.

Пролонгований. Існує два типи пролонгованої обробки: короткочасна, або ванна, обробка та невизначена пролонгована обробка.

Ванна. Необхідну кількість хімікату або препарату додають безпосередньо в блок вирощування або утримання і залишають на певний час, зазвичай на одну годину. Потім хімікат або препарат швидко змивають свіжою водою. Щоб запобігти серйозним втратам, необхідно дотримуватися кількох запобіжних заходів. Хоча рекомендується, щоб час обробки становив одну годину, за рибою слід спостерігати протягом усього періоду лікування. При перших ознаках неблагополуччя швидко підливають свіжу воду. Використання цього методу вимагає особливої обережності, щоб забезпечити рівномірний розподіл хімікату по всьому об'єму акваріума і запобігти утворенню гарячих плям хімікату.

Невизначений. Зазвичай цей метод використовується для обробки водойм або цистерн. Застосовується низька концентрація хімікату, який розсіюється природним шляхом. Це, як правило, один з найбезпечніших методів очищення. Основним недоліком є велика кількість необхідних хімікатів, які можуть бути надто дорогими. Як і при обробці у ванні, хімікат повинен бути рівномірно розподілений по всій установці, щоб запобігти утворенню гарячих точок.

Годування. При лікуванні деяких захворювань ліки або медикаменти необхідно згодовувати або якимось чином вводити в шлунок хворої людини. Це можна зробити, додаючи ліки в їжу або відваживши потрібну кількість препарату, помістивши його в желатинову капсулу, а потім за допомогою пістолета ввести її в шлунок риби. Цей тип лікування базується на вазі тіла.



Ін'єкції. Великих і цінних риб, особливо якщо йдеться про невелику кількість, іноді найкраще лікувати, вводячи ліки в порожнину тіла - внутрішньочеревно (ВЧ) - або в м'язову тканину - внутрішньом'язово (ВМ). Більшість препаратів діють швидше при внутрішньочеревному введенні, ніж при внутрішньом'язовому. Ін'єкції внутрішньочеревно вимагають обережності, щоб не пошкодити внутрішні органи. Найпростішим місцем для в/м ін'єкцій є основа одного з тазових плавників. Для ін'єкцій ІМ найкращим місцем зазвичай є ділянка безпосередньо біля спинного плавця (Parker, R. (2011)).

Зміни умов навколишнього середовища можуть призвести до зсувів у популяціях патогенів і появи нових або більш вірулентних збудників. Поява раніше нерозпізнаних захворювань, збільшення кількості спалахів хвороб, а також труднощів у діагностиці та лікуванні.

2. Захисні заходи та застосування біотехнологій для пом'якшення впливу хвороб

Управління здоров'ям риби описує методи управління, спрямовані на запобігання хворобам риби. Якщо риба захворіла, її важко врятувати. Успішне управління здоров'ям риби починається з профілактики, а не лікування. Належне управління якістю води, харчування та санітарія запобігають

рибних хвороб. Без цього неможливо запобігти спалахам опортуністичних захворювань. Риба постійно купається в потенційних патогенах, включаючи бактерії, грибки та паразитів. Погана якість води, погане харчування або пригнічення імунної системи, як правило, пов'язане зі стресовими станами, дозволяють цим потенційним патогенам викликати захворювання. Ліки, що використовуються для лікування хвороб, виграють час для риб і дозволяють їм подолати опортуністичні інфекції, але вони не можуть замінити належне утримання тварин (Parker, R. (2011)).

Глобальне потепління вимагає регулярного і всебічного моніторингу якості води, рівня патогенів і показників здоров'я. Цей моніторинг включає використання передових діагностичних інструментів і методів спостереження для раннього виявлення та подолання спалахів захворювань.

2.1. Філософія боротьби з хворобами

Контроль захворювань в аквакультурі зазвичай намагаються здійснювати, виходячи з припущення, що відсутність патогенних мікроорганізмів є бажаним станом. Однак шанси розпочати аквакультурне підприємство без будь-яких потенційних патогенів у системі дуже малі, і виникає питання, чи є економічно ефективним досягнення стану, вільного від патогенів. Ця стратегія «повного усунення патогенів» є класичним підходом до контролю захворювань: патогеноцентричним підходом (Lucas et al. (2019)).

Існує ряд факторів, які слід враховувати при прийнятті рішення про заходи контролю в аквакультурі:

- Вартість заходів контролю. Деякі патогени роблять культуру економічно не вигідною за їх присутності, і вони повинні бути повністю видалені з системи вирощування.



- Ймовірність повторного зараження. В ідеалі не повинно бути майже ніяких шансів на повторне зараження патогеном з навколишнього середовища або з диких запасів поблизу. З іншого боку, інфікування патогеном і подальше лікування часто дозволяє імунній системі хребетних підготуватись, і, таким чином, подальші інфекції обмежуються.
- Адекватний аналіз на наявність збудника. Необхідно мати можливість точно ідентифікувати збудника, щоб мати змогу оцінити вплив заходів боротьби на нього.

Методи лікування генералізованих захворювань

Найважливішим фактором переміщення та занесення патогенів на ферми, та й взагалі в будь-якому географічному масштабі, є переміщення тварин. Це включає в себе

- зокрема, живий племінний молодняк
- живі личинкові форми для зариблення
- живих альтернативних хазяїв;
- заморожені туші для споживання людиною;
- корми для аквакультури; і
- приманки.

Більшість нових інтродукцій патогенів у неінфіковані системи відбувається через необмежене переміщення заражених тварин. Іноді це неминуче, оскільки аквакультура не може існувати без маточного поголів'я або живої молоді для зариблення. Однак біобезпекою маточного поголів'я, яке є забруднювачем номер один, часто нехтують, і це має бути першим пунктом, на який слід звернути увагу в першу чергу. Так, в Європі обов'язковим є тестування плідників на широкий спектр захворювань (бактеріальних і вірусних), що підлягають повідомленню, перш ніж дозволяється їх передача (Lucas et al. (2019)).

- Пакетна культура. Культура періодичної дії працює за принципом «все на вхід, все на вихід».
- Очищення вхідної води. Обробка вхідної води є важливою в системах рециркуляції і більш корисною в інкубаторах, ніж в умовах дорощування, через велику кількість води, що використовується в останньому випадку. Обробка води включає хімічну стерилізацію (хлор, йодофори, озон) і фізичну стерилізацію (ультрафіолетове світло).
- Зменшення щільності засіву. Зниження щільності зариблення збільшує середню «міжрибну» відстань і зменшує ймовірність передачі збудника хвороби наступному хазяїну в експоненціальному масштабі. Теоретично, епідемії хвороб згасатимуть, якщо в даній місцевості не буде досягнуто порогової кількості хазяїв. Спрощено кажучи, кожен інфікований хазяїн повинен заразити щонайменше двох інших хазяїв, інакше епідемія не буде поширюватися. Крім того, зменшення щільності популяції також знизить рівень стресу, спричиненого взаємодією між братами і сестрами, та конкуренції за простір і їжу.
- Поодинокі нерестові стада. Диференційований ріст є хорошим індикатором поганого стану здоров'я популяції, що утримується в неволі. Нерест дуже корисний для



скринінгу захворювань, оскільки вони або відстають у рості під впливом патогенів, або зазнають поведінкового та харчового стресу через те, що перебувають у нижній частині харчового ланцюга. Такі тварини, що зазнали стресу, також будуть експресувати патогени. Якщо для зариблення системи вирощування використовується змішана нерестова популяція, диференційований ріст, зумовлений віком, генетичними особливостями або варіаціями умов вилуплення, затуляє собою викликаний патогенами диференційований ріст. Таким чином, зариблення з одним нерестом є особливо корисним для водного патобіолога. Цей метод не настільки корисний для багатьох видів плавникових риб, для яких градація за розміром є нормальною частиною вирощування (наприклад, вугор, лосось і форель), але він добре працює для безхребетних (наприклад, прісноводні раки). Цей метод також висвітлює проблему дуже поширеної практики серед рибних фермерів. Під час збору врожаю більшість рибних фермерів випускають мальків, які занадто малі, щоб задовольнити потреби ринку, у ставок, щоб дати їм змогу вирости до ринкового розміру. При цьому не враховується найбільш ймовірна причина того, що вони не досягають ринкового розміру: вони скомпрометовані хворобою. Таким чином, насправді фермер утримує на фермі резервуар хворих особин, які можуть заразити наступне зариблення.

- Маточне поголів'я, вільне від певних патогенів. Більшість патогенів є більш вірулентними для молодих стадій хазяїна. Отримання потомства від маточного поголів'я, вільного від специфічних патогенів, має хороші шанси вирости до несприйнятливого розміру до зараження, і, таким чином, урожай може бути отриманий навіть у зоні, де хвороби регулярно вражають тварин. Це також може спрацювати, якщо всі життєві стадії однаково сприйнятливі, але завдяки пізньому зараженню хазяїна культуру можна виростити до збору врожаю до того, як хвороба встигне закріпитися.
- Зменшення стресу. Стрес часто використовується як виправдання проблем, коли немає іншого логічного пояснення. Незважаючи на таке розпливчате використання поняття стресу, він має реальну фізіологічну основу і наслідки. Неприятливі умови призводять до адаптивної реакції, і досягається новий рівень гомеостазу. Якщо цього не відбувається, то настає виснаження, яке супроводжується надмірним виробленням гормонів стресу. Два найбільш практичні способи обмеження стресу - це подвоєння аерації, що полегшує будь-який кисневий стрес, який може виникнути, особливо під час спекотного літа, і зниження щільності утримання.
- Вакцинація. Вакцинація в основному працює на основі припущення, що існує імунологічна пам'ять і що попередній контакт з патогеном забезпечить сильнішу і швидшу імунну відповідь (Lucas et al. (2019)).

2.2. Біотехнологічні підходи до контролю захворювань

Вакцинація риби

Термін «вакцина» зараз використовується більш широко для визначення будь-якого препарату, що використовується для створення імунітету проти хвороби шляхом щеплення, а принцип дії ґрунтується на тому, що реципієнт має адаптивну імунну систему, яка ініціює



реакцію на компоненти вакцини, що призводить до запам'ятовування цих компонентів. Імунна система вакцинованої особи здатна реагувати швидше і активувати захисні ефекторні системи з більшою силою при наступних зустрічах з тими ж зразками або структурами (рис. 6) (Lucas et al. (2019)).

Імунізація риб в аквакультурі розпочалася понад 50 років тому. Вакцинація є ефективним засобом профілактики бактеріальних та вірусних захворювань. Вакцинація також сприяє екологічній, соціальній та економічній стійкості галузі аквакультури. На жаль, розробка вакцин у галузі аквакультури значно відстає від тваринництва. Лише кілька вакцин були зареєстровані та застосовуються в галузі. Крім того, вакцинація риб є трудомістким процесом, коли окремим риbam вручну вводиться доза вакцини. Пероральні вакцини є альтернативою трудомісткій традиційній вакцинації з ручним введенням. Оральна вакцинація зводить до мінімуму обробку і пошкодження риби, тим самим знижуючи рівень смертності під час вакцинації. Мікроінкапсуляція, в яку включені антигени патогенів, може бути технологією для доставки оральних вакцин риbam.

Існують способи розробки революційних вакцин для пероральних систем доставки. Однак, схоже, що наразі не існує ефективної пероральної вакцини, доступної для аквакультури (Yue & Shen, 2021).

Через глобальне потепління необхідно розробляти та застосовувати вакцини для захисту видів аквакультури від конкретних захворювань. Постійні дослідження нових вакцин та стратегій імунізації мають важливе значення. Необхідна розробка та впровадження ефективних програм вакцинації для запобігання спалахам специфічних захворювань, спричинених зміною клімату.

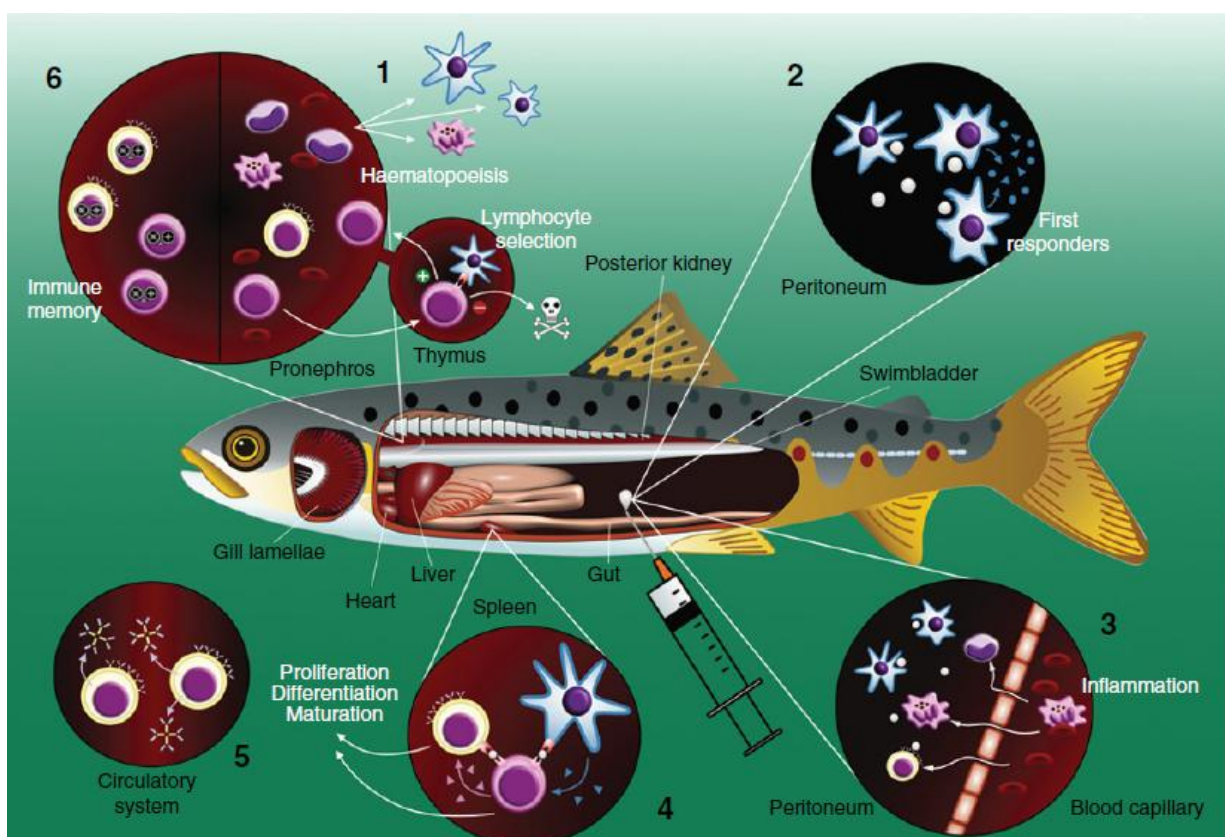


Рис.5.6 Схематичне зображення парру атлантичного лосося, що показує основні імунні тканини та розвиток відповіді на вакцинацію шляхом внутрішньочеревної ін'єкції (Lucas et al. (2019)).

Імуномодулятори та імуностимулятори

Речовини, які індукують, посилюють або пригнічують імунну відповідь, називаються імуномодуляторами, і вони мають потенціал для значного зменшення втрат, пов'язаних з хворобами в аквакультури. Існує широкий спектр речовин (рекомбінантних, синтетичних і природних), які пропонують привабливу альтернативу антибіотикам, оскільки вони, як правило, мають менше побічних ефектів, ніж існуючі ліки, і менш імовірно, що патоген розвине стійкість до них (Jeney, 2017).

Імуностимулятори - це речовини, які стимулюють імунну відповідь риб шляхом індукції або підвищення імунної активності риб, або через антиген-специфічні реакції, такі як вакцини, або неспецифічно, незалежно від розпізнавання антигену, такі як ад'юванти або неспецифічні імуностимулятори. Ад'юванти додаються до вакцин, щоб допомогти сформувати сильнішу захисну реакцію на антигени, присутні у вакцині, і забезпечити посилений захист від патогену. Цитокіни, що виробляються клітинною імунною системою, також діють як імуностимулятори і можуть посилювати імунну функцію.



Імуностимулятори отримують як з природних, так і з синтетичних джерел. Прикладами імуностимуляторів є β -глюкани, хітин, лактоферин, левамизол, вітаміни групи В і С, гормон росту і пролактин. Доведено, що імуностимулятори підвищують стійкість риб до хвороб і посилюють їхню імунну відповідь під час стресу. Їх використання зараз є звичайним явищем у програмах боротьби з хворобами для запобігання інфекційним захворюванням в аквакультурі, особливо з огляду на те, що їх можна легко

β -глюкани є найбільш поширеними імуностимуляторами в аквакультурі, особливо β -глюкан (β -1,3 і 1,6-глюкани), отриманий з клітинної стінки пекарських дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*, хоча досліджуються й інші джерела β -глюкану (Jeney, 2017).

Пробіотики, пребіотики та адаптивне харчування

Пробіотики - це живі мікроорганізми, отримані з «нормальних» бактерій навколишнього середовища або кишкових бактерій, які мають потенційну користь для здоров'я при введенні рибі. Вони визначаються як «корисні живі мікроорганізми, коли їх вводять хазяїну в ефективній дозі». Окремі бактерії видів *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus*, *Carnobacterium*, *Shewanella*, *Bacillus*, *Aeromonas*, *Vibrio*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Saccharomyces*, *Pediococcus* і *Streptococcus* були досліджені як потенційні пробіотики для аквакультури. Дія пробіотиків базується на їх здатності стимулювати ріст специфічних мікробів у кишковому тракті риби. Вони підтримують мікробну рівновагу кишечника, конкуруючи з патогенними бактеріями за місця прикріплення на слизовій оболонці кишечника, а також конкуруючи за поживні речовини. Вони мають антагоністичну активність проти збудника, оскільки виробляють різноманітні антимікробні речовини (бактерицидні або бактеріостатичні), які запобігають розмноженню та/або вбивають збудника, таким чином запобігаючи його колонізації в кишечнику риби. Вони також безпосередньо посилюють мунну відповідь хазяїна проти збудника (Jeney (2017).

Пребіотики - це неперетравлювані вуглеводи, які приносять користь організму тварини, стимулюючи ріст та/або активність певних бактерій у кишечнику тварини. Найбільш перспективними з них вважаються ферментовані вуглеводи, які позитивно впливають на склад і активність місцевої мікрофлори в кишковому тракті. Існує кілька потенційних пребіотичних вуглеводів, які були протестовані в аквакультурі. Пребіотики метаболізуються в кишечнику хазяїна такими бактеріями, як лактобактерії та біфідобактерії, а вони, в свою чергу, виробляють метаболіти, такі як коротколанцюгові жирні кислоти, які важливі для здоров'я товстої кишки. Вони також знижують рівень кишкових патогенів, присутніх у кишечнику (Jeney, 2017).

Використання пробіотиків та імуностимуляторів у кормах для зміцнення імунної системи об'єктів аквакультури, підвищення їхньої стійкості до хвороб є одним із важливих факторів мінімізації наслідків зміни клімату.

Враховуючи вплив змін навколишнього середовища на ріст і здоров'я, необхідно модифікувати рецептури кормів і практики годівлі. Це вимагає коригування профілів поживних речовин на основі температури та якості води, а також надання спеціалізованих



кормів для підтримки імунної функції та стресостійкості. Водночас, це вимагає моніторингу ефективності кормів та внесення коригувань у разі потреби. Про те, як мають змінитися корми та годівля в аквакультури у зв'язку з глобальним потеплінням, описано в окремому розділі.

2.3. Інтегровані стратегії управління патогенами у рибництві

Вплив патогенів на аквакультуру є значним - фінансові втрати оцінюються приблизно в 20% від загальної вартості продукції. Основна мета інтегрованого управління патогенами (ІУП) - об'єднати всі доступні профілактичні та лікувальні методи, щоб мінімізувати вплив патогенів у виробничому ланцюжку, і в той же час мінімізувати вплив на навколишнє середовище та уникнути майбутніх побічних ефектів, таким чином підвищуючи стійкість як на економічному, так і на екологічному рівнях (Jeney. 2017).

Термін КБВ включає в себе наступне:

Інтегрований: Це цілісний підхід, оскільки він поєднує в собі всі доступні стратегії боротьби з хворобами з акцентом на взаємодію між патогеном, хазяїном і навколишнім середовищем. Взаємозв'язок між цими трьома факторами є складним, оскільки сама по собі наявність патогену не обов'язково призводить до розвитку хвороби. Ця взаємодія, ускладнюючи епізоотологію захворювань, надає можливості мінімізувати вплив інфекції.

Збудник: Це будь-який організм, який конфліктує з рослинним або тваринним виробництвом. Якщо організм не має серйозного впливу, не варто розробляти для нього КБВ. КБВ особливо добре працює для патогенів зі складним життєвим циклом, що надає безліч можливостей для втручання.

Управління: Це спосіб утримувати патогени нижче рівня, на якому вони можуть завдати серйозної економічної шкоди. Це не завжди означає знищення патогенів. Це означає пошук стратегій, які є ефективними та економічними і зводять до мінімуму шкоду навколишньому середовищу.

Розробка СУІБП - це процес, що складається з декількох етапів, підсумованих на Рисунку 7 (Jeney, 2017). Процес ініціюється, коли патоген викликає спалах хвороби, і перший крок полягає у зборі всіх можливих знань про ключовий(і) патоген(и) (життєвий цикл, стратегії вторгнення в організм хазяїна, природні вороги, переносники тощо), а також про фактори ризику для хазяїна та навколишнього середовища, які сприяють поширенню патогенів та їх впливу на популяцію риб. Ця інформація спочатку надходить з досвіду фермерів, наукових досліджень та оглядів літератури. Другий крок - це профілактика; він передбачає розробку, оцінку доцільності та співвідношення витрат і вигод, а також впровадження найкращих профілактичних стратегій для кожного патогену. Третій крок - моніторинг захворювання, який включає виявлення збудника, спостереження за станом організму хазяїна і можливим впливом на навколишнє середовище. Якщо профілактики недостатньо, щоб зупинити хворобу, четвертим кроком є втручання; це означає розробку, оцінку доцільності та співвідношення витрат і вигод, а також впровадження фізичних, хімічних та/або біологічних методів лікування. Моніторинг також відбувається після втручання.

П'ятий крок - це переоцінка і планування з урахуванням результатів, отриманих від різних стратегій, оскільки для отримання максимальної користі від СППМ необхідно постійно оцінювати і вдосконалювати її, переглядаючи історію хвороби, переоцінюючи витрати/вигоди, консультуючись і адаптуючись до інновацій, а також постійно навчаючись. В ідеалі це має дозволити в довгостроковій перспективі визначити моделі прогнозування. Крок 5 повертається до кроку 1, збільшуючи обсяг знань. У цьому розділі ми опишемо наявні варіанти для більшості з цих кроків у рибництві, які є поточними обмежувальними факторами для їх впровадження на виробничих майданчиках, а також перспективи на майбутнє (Jeney, 2017).

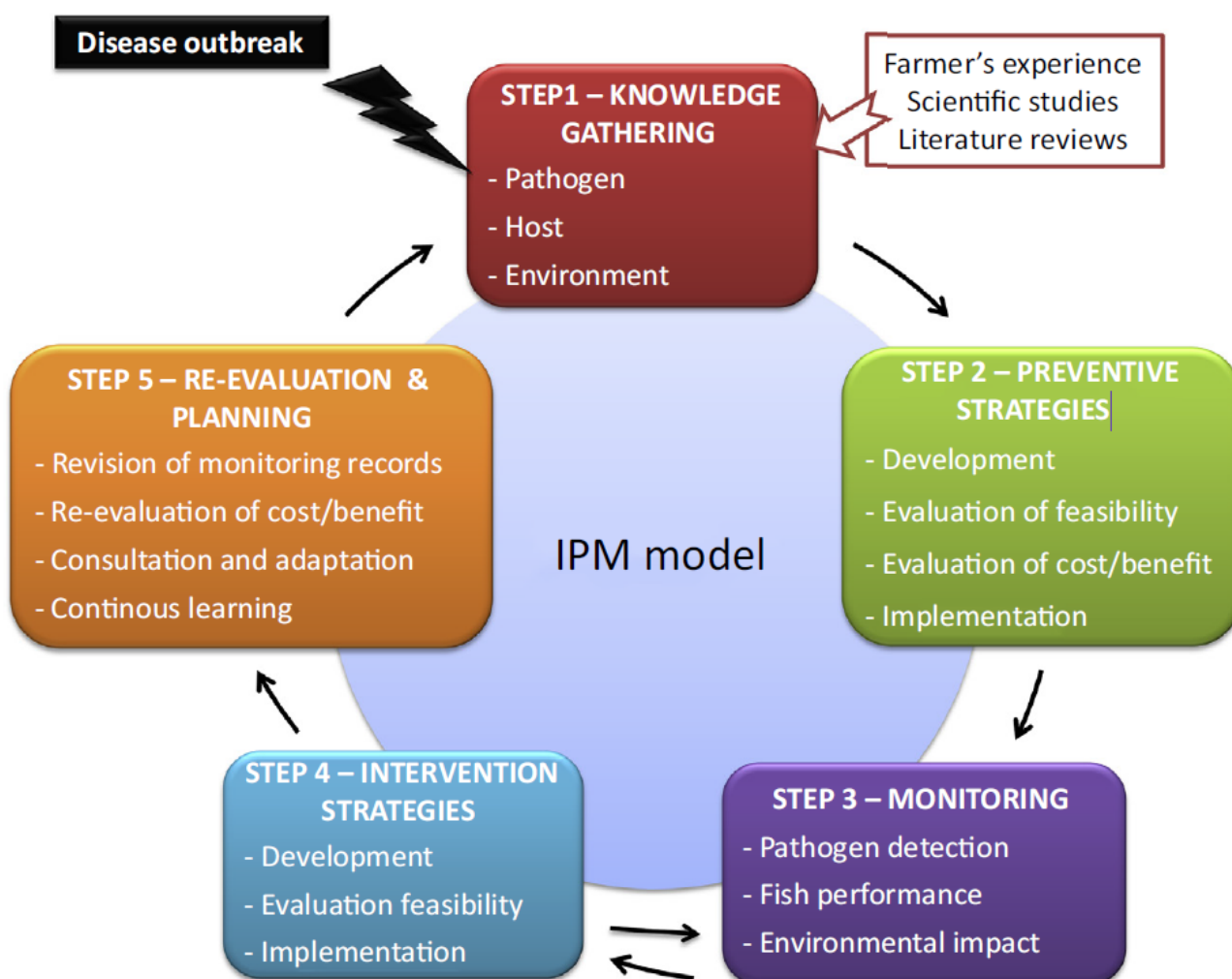


Рисунок 5.7. Процес розробки стратегій інтегрованого управління патогенами (ІУП) щодо хвороб риб (Jeney, 2017).

Глобальне потепління суттєво впливає на захворюваність та управління хворобами в системах аквакультури. Розуміючи взаємозв'язок між змінами в навколишньому середовищі та динамікою захворювань, аквакультурні підприємства можуть впроваджувати ефективні стратегії управління для пом'якшення цих впливів. Посилений моніторинг, контроль



температури та якості води, практики управління здоров'ям та стійкість інфраструктури є ключовими для підтримки здоров'я та продуктивності видів аквакультури в умовах мінливого клімату.

Основні вимоги до біобезпеки в аквакультурному господарстві

Основні вимоги (типові для Литви) до біобезпеки в аквакультурному господарстві є наступними:

1. Кожне підприємство аквакультури повинно мати план біобезпеки, щоб запобігти потраплянню забруднення на ферму та/або поширенню інфекції за її межами.
2. Колеса кожного автомобіля або іншого транспорту, що в'їжджає на територію, повинні бути продезінфіковані.
3. Контролюйте параметри якості води у рибних водоймах та ставках.
4. Дезінфекційні килимки або ванночки повинні бути розміщені на кожному вході/виході з приміщення, як всередині, так і зовні будівлі.
5. Працівники повинні переодягатися в робочий одяг, коли приходять на роботу, і знову переодягатися, коли йдуть з неї.
6. Співробітники, які працюють у відділах з різними стадіями росту риби, повинні дезінфікувати руки кожного разу, коли вони переходять з одного приміщення в інше.
7. Інструменти для вилову, транспортування, годівлі та очищення риби не можна використовувати в декількох приміщеннях.
8. Використані інструменти та обладнання необхідно зберігати в сольовому розчині до наступного використання.
9. Обмежте кількість відвідувачів, а після їх прибуття реєструйте їх та використовуйте одноразовий одяг для захисту.
10. Працівники можуть працювати тільки на одній аквакультурній фермі, щоб уникнути передачі інфекції.

План управління здоров'ям риб на рівні об'єкта має неоціненне значення, але може бути недостатнім для запобігання поширенню патогенів у більш широкі географічні регіони або з них. Тому необхідно впроваджувати політику та правила на регіональному/національному та міжнародному рівнях (Jeney, 2017).

Інші захисні заходи для мінімізації впливу зміни клімату та хвороб

Для інфраструктури аквакультури дуже важливим є вибір ділянок, які знижують ризик передачі хвороб і мінімізують вплив зміни клімату.

Залежно від типу культивационної системи та виду, що вирощується, правильний вибір ділянки може значно знизити ризик передачі хвороб. Відповідні ділянки забезпечують умови навколишнього середовища (температура води, солоність тощо), які мінімізують фізіологічний стрес, тим самим знижуючи частоту і тяжкість інфекційних захворювань на об'єкті. Слід також враховувати якість доступної води. Обсяг води та її мінлива доступність у часі може обмежувати виробничі потужності. Об'єкти з недостатнім водопостачанням часто страждають від низької продуктивності риби, більшої кількості захворювань і зниження



прибутковості. Для земляних ставків важливо переконатися, що ґрунти не забруднені сполуками, які можуть потрапити у товщу води і негативно вплинути на здоров'я риби або іншим чином забруднити м'ясо риби (Tucker & Hargreaves, 2009).

Екстремальні погодні умови можуть завдати фізичної шкоди інфраструктурі аквакультури, призвести до раптових змін якості води та занести патогени і забруднювачі в аквакультурні системи. Це може призвести до спалахів захворювань та операційних збоїв.

Глобальне потепління та його наслідки можуть спричинити фізичне пошкодження акваріумів або садків, погіршення якості води та збільшення захворюваності через забруднення або стрес. Крім того, можуть виникнути операційні проблеми в управлінні та обслуговуванні систем аквакультури.

Відповідні місця також зменшують ймовірність того, що природні явища (такі як повені, штормові припливи або великі морські хвилі) спричинять порушення біозахисту об'єкта, що може призвести до вивільнення патогенів або втечі інфікованої риби. При виборі місця також слід враховувати, чи не піддаються ризику вразливі популяції дикої риби. Чутливі популяції можуть включати види, що перебувають під загрозою зникнення, або мігруючі популяції сприйнятливих видів (Tucker & Hargreaves, 2009).

У зв'язку з глобальним потеплінням може знадобитися зміцнити існуючу структуру, підняти об'єкти для запобігання пошкодженням від повеней, а також впровадити гнучкі та стійкі системи, розробити та підтримувати плани реагування на надзвичайні ситуації для вирішення проблем пошкодження інфраструктури, якості води та спалахів хвороб, спричинених екстремальними погодними умовами.

Можна вибрати види аквакультури з більшою термостійкістю, щоб краще витримувати високі температури і знизити сприйнятливість до хвороб.

У RAS можна впровадити більше заходів та інноваційних рішень. Підтримка оптимальних температурних діапазонів може допомогти впоратися зі стресом і знизити ризики захворювань. В якості профілактичних заходів можна впроваджувати технології контролю температури з можливістю коригування налаштувань на основі даних в режимі реального часу. Регулярне тестування та оптимізація параметрів якості води, таких як рН, розчинений кисень, рівень поживних речовин тощо, можуть бути автоматизовані. Можна застосовувати такі методи, як затінення, аерація та контрольоване годування для пом'якшення впливу температури та інших стресових факторів навколишнього середовища на системи аквакультури.

Вибір системи та заходи протидії глобальному потеплінню в аквакультурі описані в окремій главі.



3. Поточні та нові рішення для подолання впливу глобального потепління на здоров'я аквакультури

3.1. Фактори, пов'язані зі зміною клімату, які сприяють виникненню проблем із захворюваннями

Інтенсифікація. Інтенсифікація виробництва, навіть за стабільних умов навколишнього середовища, створює ризики та виклики для сталого розвитку, які вимагають суворого управління, щоб мати можливість ефективно реагувати на виявлення патогенів та/або спалахи хвороб. Зміна клімату посилить ці загрози та виклики.

Великомасштабне виробництво одного виду у виробничому середовищі потребує

- 1) швидкого реагування на відмову тварин від корму, ознаки захворювання та падежу
- 2) спроможності ізолювати уражених тварин від неуражених популяцій та ферм; і
- 3) спроможність депопуляції уражених ділянок, де лікування неможливе.

Інтенсивне сільське господарство все частіше зазнає впливу екстремальних погодних умов, які викликають стрес у сільськогосподарських тварин і перешкоджають механізмам управління, наприклад, запобігання втечам (руйнування систем утримання) та ізоляції хворих і стресованих тварин від неуражених (Вплив зміни клімату на рибальство та аквакультуру: синтез сучасних знань, варіанти адаптації та пом'якшення наслідків, 2018 р.).

Видова та генетична диверсифікація. Протягом останніх 30-40 років аквакультура розвивалася за допомогою диверсифікації видів (відбір видів, що демонструють найкращі виробничі результати в умовах фермерських господарств) та генетичних штамів, розроблених в експериментальних умовах для комерційного виробництва.

Обидві методики селекції включають толерантність до хвороб (інфікування без вираженої значної смертності) та резистентність (здатність запобігати інфікуванню). Переваги селекції видів і штамів, однак, залежать від постійних параметрів навколишнього середовища у виробничій системі, тобто від відсутності значних змін умов виробництва. Якщо такі умови піддаються «екстремальним» коливанням (температура, солоність, каламутність), відібрані види та/або штами можуть бути більш вразливими до високих втрат, ніж менш відібрані та більш генетично різноманітні запаси; особливо ті, що походять з району виробництва (Вплив зміни клімату на рибальство та аквакультуру: синтез сучасних знань, варіанти адаптації та пом'якшення наслідків, 2018 р.).

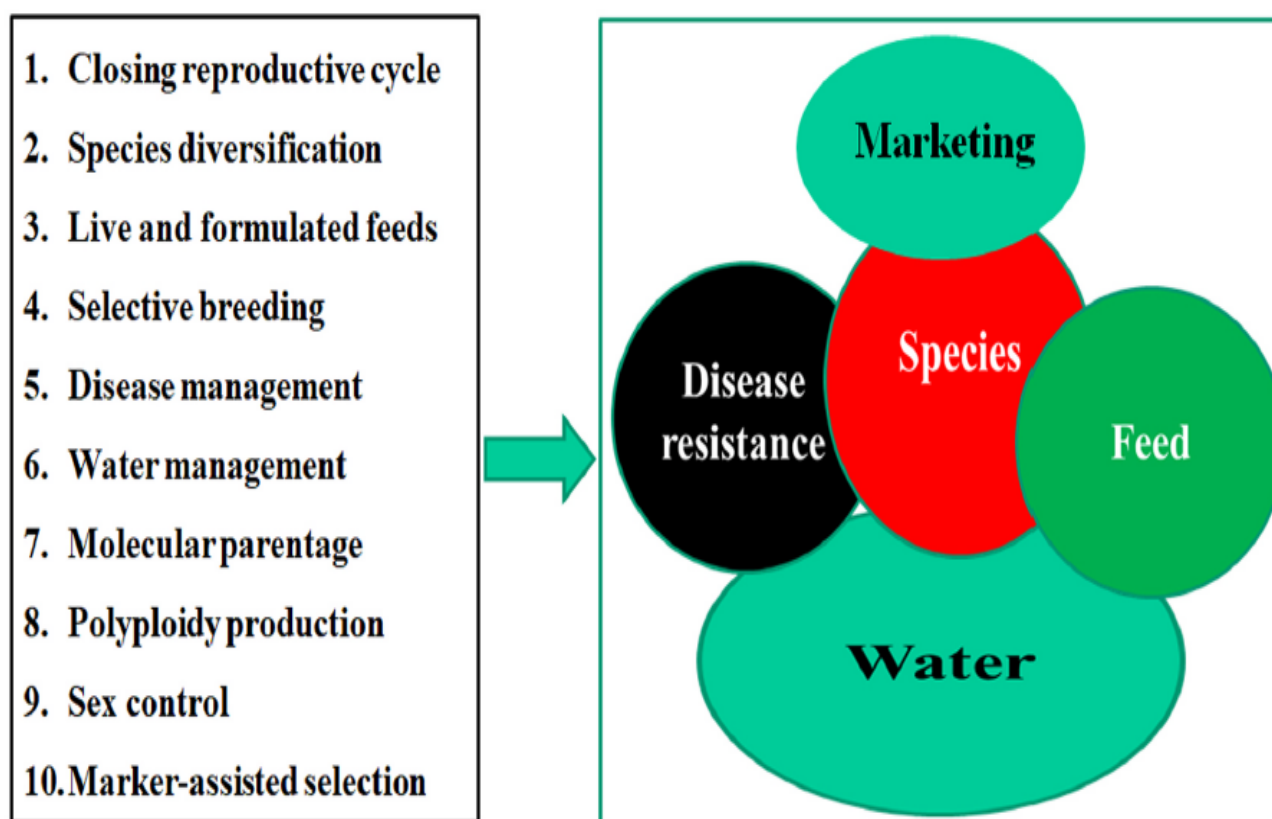
Розширення за межі природного географічного ареалу аборигенних видів, які використовуються в аквакультурі і демонструють стабільне виробництво, часто піддаються розширенню ферм на периферії або за межами їхнього природного географічного ареалу. Тварини можуть витримувати незначні сезонні зміни температури та/або солоності, але опиняються в невідгідному становищі, коли екстремальні умови впливають на нормальний репродуктивний цикл або цикл росту.

Що стосується інтенсифікації та видової і генетичної диверсифікації, то там, де відбуваються такі зміни навколишнього середовища, стійкість до опортуністичних або первинних

патогенних інфекцій може значно знизитися (Вплив зміни клімату на рибальство та аквакультуру: синтез сучасних знань, варіанти адаптації та пом'якшення наслідків, 2018 р.).

3.2. Генна інженерія, селекція за допомогою маркерів та CRISPR

Біотехнології, включаючи контроль статі, поліплоїдизацію, гіногенез та андрогенез (рис. 6), відіграли важливу роль у підвищенні продуктивності аквакультури (Yue & Shen, 2021).



A. Technologies applied to aquaculture B. Important components in aquaculture

Рисунок 5.6 Технології, що застосовуються в аквакультурі, призводять до швидкого зростання виробництва аквакультури (Yue & Shen, 2021)

Генетичне поліпшення за допомогою селекції стало ключовим фактором буму світової аквакультури.

Поєднання молекулярних технологій з існуючими селекційними програмами значно прискорило генетичне поліпшення деяких видів аквакультури. Селекція за допомогою маркерів (MAS) вже застосовується для підвищення стійкості до хвороб (наприклад, стійкості до IPN у лосося) (Yue & Shen, 2021).

Геномна селекція (ГС) - це новий підхід молекулярної селекції. ГС використовує багато маркерів як предикторів продуктивності і, отже, забезпечує більш точні прогнози селекційних



цінностей. З постійним розвитком секвенування та біоінформаційних технологій, а також зниженням вартості генотипування SNP (однонуклеотидний поліморфізм), ГС з використанням SNP, що охоплюють весь геном, та/або з використанням відібраних SNP, пов'язаних з ознаками, все частіше застосовується для широкого спектру видів аквакультури для оптимізації селекції та прискорення генетичного вдосконалення (Yue & Shen, 2021).

Редагування геному (ГЕ) з використанням CRISPR/Cas здатне прискорити генетичне поліпшення видів аквакультури, якщо відомі гени, які підлягають редагуванню. ГЕ дозволяє швидко вводити в геном сприятливі алелі, збільшувати частоту бажаних алелів у локусах, що визначають важливі ознаки, генерувати нові алелі та/або вводити сприятливі алелі з інших видів. Аквакультурні види особливо підходять для ГЕ завдяки своїй високій плодючості та зовнішньому заплідненню, що дозволяє редагувати геном багатьох особин одночасно.

Досягнення в галузі ГС і ГЕ можуть кардинально змінити індустрію аквакультури, сприяючи поліпшенню економічно важливих ознак багатьох видів аквакультури. У майбутньому поєднання ГС і ГЕ з передовими традиційними стратегіями розведення та розвиненими біотехнологіями значно прискорить генетичне вдосконалення в аквакультурі (Yue & Shen, 2021).

Глобальне потепління та селекція, біотехнології в аквакультурі описані в окремому розділі

3.3. Відповідаючи на виклики майбутнього

Нові підходи знизили захворюваність і залежність від антибіотиків та хімічних терапевтичних засобів. У Норвегії розробка вакцин і поліпшення біозахисту (контроль і локалізація хвороб) значно знизили потребу в антибіотиках при вирощуванні лосося. Необхідні інвестиції в біобезпеку для мінімізації ризику спалахів хвороб будуть відрізнятися залежно від місця і масштабу, але спільним елементом є потреба в поліпшенні діагностичних і наглядових можливостей національних ветеринарних служб. Хоча аквакультура і надалі стикатиметься з новими хворобами, будуть розроблятися нові технології управління здоров'ям, щоб відповідати на ці виклики. Вартість секвенування геному падає в геометричній прогресії. Це дозволить розробляти методи діагностичного тестування, а також ліки та інші види терапії, адаптовані до конкретних штамів патогенів, у формі індивідуального лікування хвороб. (Лукас та ін. (2019).

Ключовою мегатенденцією є прискорення технологічних змін, особливо у сфері біотехнологій, нанотехнологій, інформаційних та комп'ютерних технологій. Дослідження і розвиток науки і техніки в усьому світі прискорюються завдяки економічному зростанню та державним інвестиціям. Датчики, програмне забезпечення та бездротовий зв'язок дозволяють збирати та аналізувати дані в режимі реального часу. Підключені до пристроїв виводу, вони дозволяють своєчасно з вихідними пристроями, вони дозволяють своєчасно реагувати на вхідні дані. Наприклад, відеомоніторинг годівлі лосося забезпечує ефективну годівлю з кращою конверсією корму, меншими втратами корму і меншим забрудненням. Датчики кисню в ставках, пов'язані з програмним забезпеченням для аналізу і контролю, можуть активувати

аератори для контролю концентрації кисню в ставку. «Інтернет речей» буде підтримуватися розвитком

датчиків, автоматизації, автономних машин, дронів і підводних апаратів. Цифрові та роботизовані технології все частіше доповнюватимуть або замінюватимуть працівників (Lucas et al. (2019)).

Технології відіграють ключову роль у підвищенні продуктивності та екологічних показників аквакультури. Ключовими сферами для інновацій є корми, генетичне вдосконалення, боротьба з хворобами, насінництво та виробничі системи вирощування (Lucas et al. (2019)).

Інвестиції в дослідження для розуміння впливу глобального потепління на динаміку захворювань і розробку інноваційних рішень для профілактики та лікування хвороб є вкрай важливими.

Інтенсивна співпраця з дослідниками та установами для вивчення нових технологій, стійких до хвороб штамів та адаптивних методів управління має стати способом мінімізації впливу глобального потепління та ефективних методів управління хворобами.

Аквакультура потребує все більше освічених практиків та експертів. Навчальні семінари, вебінари та ресурси з профілактики захворювань, екологічного менеджменту та адаптивних стратегій є дуже корисними та необхідними.

Підсумок

Глобальне потепління впливає на здоров'я та управління видами аквакультури через різні механізми, включаючи збільшення поширеності хвороб, ослаблення імунної функції та погіршення якості води. Ефективне управління вимагає багатогранного підходу, який включає посилений моніторинг, екологічний контроль, управління якістю води, управління здоров'ям, стійкість інфраструктури та адаптивне годування. Впроваджуючи ці стратегії та залишаючись поінформованими про нові виклики та рішення, аквакультурні підприємства можуть краще захистити свої види та забезпечити стале виробництво в умовах мінливого клімату.

Список використаних джерел

Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S., & Poulain, F. (eds.). (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627*. Rome, FAO, 628.

Clinical Guide to Fish Medicine. (2021). In *Wiley eBooks*. <https://doi.org/10.1002/9781119259886>

Elston, R. A. (1990). *Mollusc Diseases: Guide for the Shellfish Farmer*. Washington Sea Grant Program, University of Washington Press, Seattle.

Ergün, D. et al. (2020). *Handbook on European Fish Farming*. Tudás Alapítvány, 326.

Jeney, G. (2017). *Fish diseases: Prevention and Control Strategies*. Academic Press.

Fish viruses and bacteria: pathobiology and protection. (2017). In *CABI eBooks*. <https://doi.org/10.1079/9781780647784.0000>

Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627*. Rome, FAO, 628.

Lal, J., Vaishnav, A., Singh, S. K., Meena, D. K., Biswas, P., Mehta, N. K., & Priyadarshini, M. B. (2024). Biotechnological innovation in fish breeding: from marker assisted selection to genetic modification. *Deleted Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44340-024-00007-6>.



- Lucas, J. S., Southgate, P. C., & Tucker, C. S. (2019). *Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants*. John Wiley & Sons.
- Noga, E. J. (2010). *Fish disease: diagnosis and treatment*. John Wiley & Sons.
- Parker, R. (2011). *Aquaculture Science*. Delmar.
- Timmons, M. B., & Center, N. R. A. (2013). *Recirculating Aquaculture*.
- Tucker, C. S., & Hargreaves, J. A. (eds.). (2009). *Environmental best management practices for aquaculture*. John Wiley & Sons.
- Yue, K., & Shen, Y. (2021). An overview of disruptive technologies for aquaculture. *Aquaculture and Fisheries*, 7(2), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.04.009>
- Woo, P. T., & Iwama, G. K. (eds.). (2019). *Climate change and non-infectious fish disorders*. CABI.



Розділ 6. Вибір систем для аквакультури в умовах глобального потепління

Доцент, д-р Дімітріс Клаудадос
Університет Фессалії (УН)

Вступ

Глобальне потепління має значний вплив на водні екосистеми та аквакультуру, що вимагає впровадження стійких систем для вирішення таких проблем, як підвищення температури, виснаження кисню та зростання поширеності захворювань. Сталі практики аквакультури мають вирішальне значення для пом'якшення цих наслідків, а вибір системи відіграє ключову роль у забезпеченні адаптивності та довгострокової життєздатності. У цьому розділі надається всебічний аналіз впливу зміни клімату на системи аквакультури, досліджуються інноваційні рішення та стратегії, які можуть слугувати орієнтиром для політиків, дослідників та зацікавлених сторін галузі у сприянні сталому розвитку сектору. Дослідження підкреслюють важливість впровадження кліматично стійких технологій, таких як системи рециркуляційної аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА), для підвищення продуктивності та зменшення впливу на довкілля (Boyd et al., 2022; Handisyde et al., 2017; Froehlich et al., 2018).

Аквакультура є одним із найшвидше зростаючих секторів виробництва харчових продуктів у світі і відіграє важливу роль у задоволенні потреб у харчуванні зростаючого населення. Однак наслідки глобального потепління створили значні виклики для її сталого розвитку. Підвищення глобальної температури, підкислення океанів, зміни солоності та поширення патогенів змінюють водних екосистем, створюючи нові виклики для аквакультури. Ці екологічні зміни загрожують не тільки економічній життєздатності галузі аквакультури, але й глобальній продовольчій безпеці та біорізноманіттю.

Зміна клімату посилює тепловий стрес у водних середовищах, впливаючи на швидкість метаболізму, ріст і розмноження вирощуваних видів. За даними Бойда і МакНевіна (2015), коливання температури за межами оптимального діапазону для видів аквакультури можуть призвести до збільшення потреби в кисні, зниження імунної відповіді та підвищення рівня смертності. Крім того, потепління води створює сприятливі умови для шкідливого цвітіння водоростей (HAB), яке може виснажувати запаси кисню та вивільняти токсини, шкідливі для водних організмів (Diaz & Rosenberg, 2008). Ці явища вимагають інноваційних підходів до проектування та управління системами аквакультури.

Закислення океану, яке є прямим наслідком підвищення рівня вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері, становить ще одну серйозну проблему. Закислені води зменшують кількість карбонатних іонів, необхідних молюскам та іншим кальцифікуючим організмам для формування раковин і скелетів. Дослідження Cooley et al. (2009) підкреслюють економічні та екологічні ризики, пов'язані із закисленням, особливо для промисловості з видобутку



моллюсків. Крім того, зміни солоності, спричинені таненням льодовиків та зміною режиму опадів, порушують географічний розподіл видів аквакультури, що вимагає коригування діяльності з урахуванням цих динамічних умов (Troell et al., 2003).

Поширення хвороб є все більш актуальною проблемою в системах аквакультури в умовах зміни клімату. Підвищення температури прискорює життєвий цикл багатьох патогенів і паразитів, збільшуючи частоту і тяжкість спалахів захворювань. Наприклад, *Vibrio* spp., поширений патоген в аквакультурі, добре розмножується при підвищених температурах, що призводить до значних економічних втрат (Bondad-Reantaso et al., 2005). Ці виклики підкреслюють важливість впровадження кліматично стійких систем аквакультури, які можуть пом'якшити негативні наслідки глобального потепління.

Вибір системи є вирішальним кроком у адаптації до цих викликів. Закриті рециркуляційні аквакультурні системи (RAS), інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА) та морські аквакультурні системи представляють інноваційні підходи, які можуть підвищити стійкість та сталість. Згідно з Martins et al. (2010), RAS забезпечує точний контроль навколишнього середовища, зменшуючи зовнішні стресові фактори для водних видів. ІМТА інтегрує види з доповнюючими екологічними ролями, покращуючи цикл поживних речовин та здоров'я екосистеми. Морська аквакультура, що функціонує в глибоких водах зі стабільними екологічними умовами, є життєздатною альтернативою прибережним системам, які вразливі до евтрофікації та гіпоксії, спричинених кліматичними змінами (Holmer, 2010; Pereira et al., 2024).

1. Кліматичні виклики для систем аквакультури

Глобальне потепління створило значні виклики для систем аквакультури, включаючи підвищення температури води, підкислення океану та зміну рівня солоності, що негативно впливає на здоров'я та продуктивність водних організмів. Підвищений тепловий стрес прискорює метаболізм, а евтрофікація та гіпоксія загрожують водним середовищам існування. Крім того, зміна клімату сприяє поширенню хвороб і патогенів, особливо серед видів з вузькою екологічною толерантністю (Boyd & McNevin, 2015; Diaz & Rosenberg, 2008). Розуміння цих наслідків має вирішальне значення для розробки адаптивних стратегій, що забезпечують стійкість аквакультури.

1.1. Термічний стрес

Глобальне підвищення температури становить значну проблему для систем аквакультури, особливо для видів з вузьким діапазоном термотолерантності. Наприклад, дослідження показують, що підвищення температури води призводить до підвищення рівня метаболізму у риб, збільшення потреби в кисні та стресу (Boyd & McNevin, 2015).

Підвищення глобальної температури становить значну проблему для аквакультури, особливо для видів з вузьким діапазоном термотолерантності. Риби, молюски та інші водні організми часто мають обмежений діапазон оптимальних температур, необхідних для їх фізіологічних функцій. Підвищення температури збільшує швидкість метаболізму, що призводить до підвищення потреби в кисні та фізіологічного стресу (Boyd & McNevin, 2015). З підвищенням



температури води доступність кисню зменшується через зниження його розчинності, що створює умови для температурно-індукованої гіпоксії. Це явище збільшує смертність таких видів, як лосось і тіляпія, особливо в стратифікованих водоймах, де рівень кисню і без того коливається.

1.2. Евтрофікація та поширення хвороб

Кліматично обумовлена евтрофікація прискорює надходження поживних речовин у водні екосистеми шляхом збільшення стоку поживних речовин від сільськогосподарської діяльності та інтенсифікації опадів. Надлишок поживних речовин, зокрема азоту та фосфору, призводить до шкідливого цвітіння водоростей (НАВ), які виділяють токсини та виснажують розчинений кисень під час розкладання. Евтрофікація є основною причиною виникнення гіпоксичних зон, які часто називають «мертвими зонами» і які роблять водні середовища непридатними для життя. Наприклад, гіпоксична зона Мексиканської затоки, що живиться поживними речовинами з річки Міссісіпі, розширилася через антропогенні та кліматичні чинники, що вплинуло на рибні запаси та аквакультуру.

Тепліші води створюють сприятливі умови для патогенів і паразитів, що збільшує ризики в системах аквакультури. Наприклад, *Vibrio* spp. процвітає при підвищених температурах, що призводить до економічних втрат у вирощуванні креветок і риби (Bondad-Reantaso et al., 2005; Rounds et al., 2006). Крім того, тепліші температури послаблюють імунну систему водних організмів, роблячи їх більш вразливими до інфекцій. Наприклад, зараження морськими вошами на фермах з вирощування лосося погіршилося в останні роки, що призвело до значних економічних втрат і збільшення залежності від хімічних засобів лікування, які несуть ризики для навколишнього середовища (Abolofia et al., 2017).

1.3. Закислення океану та зміни солоності

Окислення океану є ще однією критичною проблемою, що впливає на аквакультуру, особливо на вирощування молюсків. Коли атмосферний CO₂ розчиняється в океанах, він утворює вугільну кислоту, яка знижує рівень pH і зменшує доступність карбонатних іонів, необхідних для формування раковин і скелетів у кальцифікуючих організмах (Cooley et al., 2009). Молодики, такі як устриці та молюски, є особливо вразливими, оскільки підкислення води призводить до стоншення раковин і зниження рівня виживання. Крім того, підкислення порушує сенсорні функції деяких видів риб, змінюючи їхню поведінку щодо уникнення хижаків та динаміку екосистеми (Munday et al., 2009)..

Танення льодовикових шапок і зміна режиму опадів змінюють рівень солоності в морських і естуарних середовищах, що, в свою чергу, впливає на розподіл і продуктивність видів аквакультури. Такі види, як креветки і морський окунь, які чутливі до коливань солоності, можуть зазнавати зниження росту і репродуктивності (Troell et al., 2003). У Бангладеш підвищення рівня солоності прибережних вод змусило креветкові ферми адаптуватися шляхом впровадження солесійких видів; однак ці зміни супроводжуються значними економічними та екологічними витратами.



2. Ключові критерії вибору системи

Вибір систем аквакультури, які можуть протистояти негативним наслідкам зміни клімату, є життєво важливим для забезпечення сталого розвитку та економічної життєздатності. Ключовими критеріями є стійкість до коливань температури, зменшення евтрофікації, контроль патогенів, енергоефективність та адаптивність до змін солоності. Такі системи, як рециркуляційні аквакультурні системи (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА), ефективно вирішують ці проблеми, забезпечуючи, відповідно, контроль навколишнього середовища та цикл поживних речовин (Martins et al., 2010; Pereira et al., 2024). Ці критерії забезпечують адаптивність аквакультурних систем до мінливих кліматичних умов.

2.1. Стійкість до змін навколишнього середовища

Закриті рециркуляційні аквакультурні системи (RAS) забезпечують точний контроль температури, підвищуючи адаптивність системи до теплового стресу. Системи повинні бути адаптовані до коливань температури, щоб зменшити тепловий стрес для водних організмів. Закриті рециркуляційні аквакультурні системи (RAS) є особливо ефективними, забезпечуючи точний контроль температури води та інших параметрів навколишнього середовища. RAS надає значні переваги у підтримці оптимальних умов для росту та виживання видів (Martins et al., 2010). Прикладом є аквакультура лосося в Норвегії, яка використовує технологію RAS для пом'якшення впливу підвищення температури моря (Badiola et al., 2012).

Пом'якшення евтрофікації

Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА) включає фільтруючих організмів і водорості для зменшення навантаження поживними речовинами, поглинання надлишку поживних речовин, поліпшення загальної якості води та зменшення евтрофікації (Pereira et al., 2024). Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА) є стійким рішенням для управління поживними речовинами. ІМТА об'єднує такі види, як риба, водорості та молюски, для переробки поживних речовин та зменшення ризиків евтрофікації. Водоростеві ферми в Азії продемонстрували практичний цикл поживних речовин, зменшивши кількість шкідливих водоростей та поліпшивши якість води (Troell et al., 2003).

Контроль патогенів

Зміна клімату посилила ризики поширення патогенів і захворювань в аквакультурі, оскільки підвищення температури води прискорює життєвий цикл шкідливих організмів, включаючи бактерії, віруси та паразитів. Для захисту аквакультурних господарств від цих ризиків необхідні передові стратегії боротьби з патогенами. Біобезпечні системи, такі як рециркуляційні аквакультурні системи (RAS), відіграють важливу роль, ізолюючи вирощувані види від зовнішнього середовища, що значно зменшує їхній контакт із патогенами. Такі технології, як ультрафіолетова (УФ) стерилізація, озонове очищення та біофільтри, ефективно мінімізують мікробне навантаження у водних системах, тим самим захищаючи водні види (Bondad-Reantaso et al., 2005). Наприклад, ферми з вирощування креветок у Південно-Східній Азії успішно використовують RAS у поєднанні з УФ-стерилізацією для боротьби зі спалахами вібріонів, які часто спричиняються підвищенням температури моря (Aly & Fathi, 2024).



Практики аквакультури, стійкі до патогенів, такі як селекційне розведення для толерантності до хвороб, ще більше підвищують стійкість вразливих видів.

2.2. Енергоефективність та вуглецевий слід

Енергоефективні системи відіграють вирішальну роль у зменшенні вуглецевого сліду аквакультурних господарств. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, та впровадження ефективних технологій, таких як сучасні системи аерації, є життєво важливими для сталого розвитку галузі. Системи рециркуляційної аквакультури (RAS), хоча і є енергоємними через необхідність перекачування води, аерації та регулювання температури, є перспективним шляхом до сталого розвитку, якщо вони працюють на відновлюваних джерелах енергії. Наприклад, було доведено, що гібридні RAS, що працюють на сонячній енергії, зменшують операційні витрати на енергію на 30% при збереженні продуктивності (Manolache & Andrei, 2024).

Інноваційні енергетичні рішення, такі як системи перетворення відходів в енергію, що перетворюють органічні відходи аквакультури в біогаз, ще більше підвищують стійкість, вирішуючи проблеми управління відходами (Martins et al., 2010). Сонячні системи аквакультури в регіонах з обмеженими ресурсами, включаючи Африку на південь від Сахари, демонструють, як енергоефективні рішення можуть сприяти як екологічній, так і економічній стійкості. Використовуючи відновлювані джерела енергії та ефективні технології аерації, галузь аквакультури може значно зменшити свій вплив на навколишнє середовище, одночасно сприяючи довгостроковій стійкості та продуктивності (Badiola et al., 2012).

Пристосованість до коливань солоності

Системи, розташовані в прибережних і естуарних регіонах, повинні враховувати зміни солоності, спричинені глобальним потеплінням. Пріоритет може бути наданий евригаліновим видам, здатним переносити широкий діапазон солоності. Для виведення видів з підвищеною толерантністю до солоності часто використовуються програми селекційного розведення (Rahman et al., 2021). Прикладом є адаптація аквакультурних господарств у Бангладеш до проникнення солоності шляхом вирощування солестійких видів, таких як тілапія.

Адаптованість до коливань солоності є вирішальним фактором для аквакультурних систем, особливо в прибережних і естуарних регіонах, де кліматичні зміни спричиняють значні зміни в режимі солоності. Танення полярних льодовиків, зміна режиму опадів і підвищення рівня моря сприяють непередбачуваним коливанням солоності, що впливає на види, чутливі до цих змін. Системи повинні надавати пріоритет вибору видів та технологічним рішенням для підтримки продуктивності в таких умовах. У цих середовищах зазвичай віддають перевагу евригаліновим видам, які толерують широкий діапазон рівнів солоності. Наприклад, тілапія та морський окунь виявляють сильну стійкість до коливань солоності, що робить їх ідеальними кандидатами для аквакультури в мінливих середовищах (Tine et al., 2014; Rahman et al., 2021).

Технологічні втручання, такі як програми селекційного розведення, сприяли розвитку штамів з підвищеною толерантністю до солоності. Дослідження тилапії показали потенціал для розведення солестійких варіантів, здатних процвітати в середовищах, що зазнають впливу



солоності (Yue et al., 2024). Крім того, закриті системи, такі як рециркуляційні аквакультурні системи (RAS), забезпечують контрольоване середовище, в якому рівень солоності можна регулювати відповідно до вимог конкретних видів, зменшуючи стрес і підвищуючи темпи росту. Інновації в технологіях фільтрації та опріснення води також дозволяють операторам ефективно пом'якшувати вплив коливань солоності (Martins et al., 2010).

Прикладами адаптивних практик аквакультури є операції в Бангладеш, які перейшли на солестійкі види у відповідь на підвищення солоності узбережжя. Ці практики мінімізували економічні втрати та зміцнили продовольчу безпеку в уразливих регіонах (Troell et al., 2023). Завдяки пріоритетності адаптивності системи аквакультури можуть краще протистояти динамічним викликам, пов'язаним із глобальним потеплінням, забезпечуючи стале виробництво та стійкість.

Економічна доцільність та масштабованість

Економічна життєздатність та масштабованість передових систем аквакультури мають вирішальне значення для забезпечення їх широкого впровадження. Хоча такі системи, як RAS та ІМТА, пропонують довгострокові переваги, їх високі початкові витрати можуть відлякувати малих та середніх операторів. Механізми розподілу витрат, такі як державно-приватне партнерство та державні субсидії, можуть вирішити фінансові проблеми. Крім того, економія масштабу, досягнута завдяки більшим операціям або кооперативним моделям, може знизити витрати на одиницю продукції. Дослідження показують, що масштабування систем ІМТА в Канаді підвищило ефективність виробництва на 25% і одночасно значно поліпшило екологічні показники (Baltadakis, 2021). Інновації в модульних системах аквакультури, які дозволяють поступове розширення, забезпечують гнучкі та економічно ефективні рішення для нових учасників галузі.

3. Інноваційні системи для вирішення кліматичних проблем

Інноваційні системи аквакультури, такі як морська аквакультура, RAS та ІМТА, є дієвими рішеннями для боротьби з проблемами, спричиненими зміною клімату. Морська аквакультура зменшує ризики евтрофікації та гіпоксії завдяки роботі в стабільних глибоководних середовищах, а RAS забезпечує точний контроль навколишнього середовища, мінімізуючи зовнішні впливи. ІМТА підвищує екологічну стійкість шляхом інтеграції взаємодоповнюючих видів, поліпшення переробки поживних речовин та якості води (Holmer, 2010; Pereira et al., 2024). Ці технології демонструють потенціал для сталого розвитку аквакультури, що відповідає екологічним та економічним цілям.

Офшорна аквакультура

Офшорна аквакультура стала перспективним рішенням для подолання проблем, спричинених кліматичними змінами в прибережних і прибережних системах. Ці системи, що функціонують у глибоких водах, мають стабільний температурний режим, вищий рівень кисню та меншу концентрацію поживних речовин, що зменшує ризики, пов'язані з евтрофікацією та гіпоксією (Holmer, 2010). Морські садки, такі як ті, що використовуються для вирощування доради (*Sparus aurata*) та європейського морського окуня (*Dicentrarchus labrax*) у Середземному морі,



демонструють потенціал цих систем для розширення виробництва аквакультури при мінімізації впливу на навколишнє середовище (Nielsen et al., 2021). Однак морські системи вимагають значних інвестицій у надійну інфраструктуру, щоб витримувати сильні течії та хвилі, а також у сучасні технології моніторингу для забезпечення операційної ефективності.

Системи рециркуляційної аквакультури (RAS)

RAS мінімізує використання води та дозволяє точно контролювати навколишнє середовище, зменшуючи вплив зовнішніх кліматичних коливань (Martins et al., 2010). Системи рециркуляційної аквакультури (RAS) представляють собою передовий підхід до вирішення екологічних проблем та обмежень ресурсів. Ці закриті системи рециркулюють воду в контрольованому середовищі, значно зменшуючи використання води та обмежуючи вплив зовнішніх коливань навколишнього середовища (Badiola et al., 2012). RAS дозволяє точно контролювати температуру, рівень кисню та управління відходами, що робить її придатною для видів, чутливих до змін навколишнього середовища. Наприклад, вирощування лосося в Норвегії все більше покладається на RAS для пом'якшення наслідків потепління прибережних вод. Однак високі енергетичні потреби та експлуатаційні витрати RAS вимагають постійних інновацій для підвищення енергоефективності та економічної рентабельності (Martins et al., 2010).

Інтегрована мультитрофічна рециркуляційної аквакультура (ІМТА)

Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА)

ІМТА підвищує екологічну стійкість шляхом інтеграції видів з доповнюючими функціями, таких як риба, молюски та водорості (Pereira et al., 2024). Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА) — це інноваційна система, яка об'єднує кілька видів з різних трофічних рівнів в одному господарстві. Ця система використовує природні екологічні взаємовідносини між видами для поліпшення циклу поживних речовин і зменшення впливу на навколишнє середовище. Наприклад, водорості та двостулкові молюски можуть поглинати надлишок поживних речовин, що утворюються в результаті вирощування риби, зменшуючи евтрофікацію та поліпшуючи якість води (Pereira et al., 2024). У Канаді системи ІМТА, що включають атлантичного лосося (*Salmo salar*), мідій (*Mytilus edulis*) та ламінарію (*Saccharina latissima*), продемонстрували екологічні та економічні переваги, зокрема збільшення виробництва біомаси та зменшення навантаження поживними речовинами на навколишні води (Troell et al., 2003).

Аквакультура морських водоростей

Вирощування водоростей набуває визнання як стійка до кліматичних змін система аквакультури, що має значні екологічні переваги. Водорості поглинають вуглекислий газ і поживні речовини з води, протидіючи окисненню та евтрофікації океану. Крім того, вирощування водоростей було запропоновано як стратегія поглинання вуглецю для пом'якшення наслідків зміни клімату (Froehlich et al., 2019). В Азії великі ферми з вирощування морських водоростей роблять значний внесок у місцеву економіку, одночасно покращуючи стан морських екосистем. Нові технології, такі як морські платформи для

виращування морських водоростей, ще більше розширюють потенціал сталого виробництва морських водоростей у регіонах з обмеженим прибережним простором (Visch et al., 2023).

Інтелектуальні технології аквакультури

Інтеграція цифрових технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), Інтернет речей (IoT) та дистанційне зондування, революціонізувала діяльність у галузі аквакультури. Розумні системи забезпечують моніторинг параметрів навколишнього середовища в режимі реального часу, включаючи температуру, солоність та розчинений кисень, що дозволяє фермерам оперативно реагувати на зміну умов (Føre et al., 2018). Наприклад, автоматизовані системи годування та діагностика здоров'я на основі ШІ підвищують ефективність роботи та зменшують відходи. Ці інновації сприяють стійкості та масштабованості систем аквакультури в умовах тиску кліматичних змін.

4. Політичні та економічні міркування

Впровадження кліматично стійких систем аквакультури вимагає всебічної політичної підтримки та економічних механізмів. Регуляторні стимули, такі як субсидії та гранти, можуть компенсувати високі початкові витрати, а міжнародне співробітництво та ринковий попит на стійкі продукти сприяють трансформації галузі. Системи сертифікації та екологічні маркування забезпечують економічні стимули для екологічно відповідальних практик. Крім того, механізми страхування, адаптовані до кліматичних ризиків, забезпечують безперебійність діяльності вразливих зацікавлених сторін (FAO, 2020; Bush et al., 2013). Ці міркування мають вирішальне значення для узгодження практик аквакультури з глобальними цілями сталого розвитку.

Регуляторна підтримка

Уряди відіграють ключову роль у сприянні розвитку кліматично стійких систем аквакультури. Політика повинна надавати пріоритет стимулам для впровадження стійких технологій, таких як системи рециркуляційної аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА). Наприклад, Спільна рибальська політика Європейського Союзу (CFP) сприяє розвитку стійкої аквакультури шляхом інтеграції стратегій адаптації до кліматичних змін (FAO, 2020). Субсидії, податкові пільги та гранти можуть додатково стимулювати інвестиції в інноваційні системи. Крім того, нормативно-правові рамки повинні враховувати такі питання, як ефективність використання води, управління відходами та боротьба з хворобами, щоб привести практики аквакультури у відповідність до цілей екологічної стійкості (ОЕСР, 2021).

Економічна доцільність

Високі початкові витрати на сучасні системи, такі як RAS та ІМТА, повинні компенсуватися довгостроковими вигодами, включаючи зменшення втрат від впливу кліматичних змін (Tett et al., 2011). Перехід до сучасних систем аквакультури часто пов'язаний з високими початковими витратами, що може стримувати їх широке впровадження, особливо в регіонах з низьким і середнім рівнем доходів. Аналіз витрат і вигоди є необхідним для демонстрації довгострокових економічних переваг систем, стійких до кліматичних змін, включаючи



зменшення втрат від екологічних та пов'язаних з хворобами порушень. Наприклад, RAS зменшує залежність від зовнішніх джерел води та мінімізує екологічні ризики, що з часом призводить до зниження операційних витрат (Badiola et al., 2012). Державно-приватні партнерства та програми фінансової допомоги можуть заповнити прогалини у фінансуванні, забезпечуючи ширший доступ до цих технологій (Світовий банк, 2013).

4.1. Міжнародне співробітництво та інформування споживачів

Вплив зміни клімату виходить за межі національних кордонів, що вимагає міжнародної співпраці. Спільні дослідницькі ініціативи, такі як ті, що реалізуються в рамках програми «Горизонт Європа», зосереджуються на розробці технологій аквакультури, стійких до зміни клімату, та обміні передовим досвідом між зацікавленими сторонами (Європейська служба зовнішніх справ, 2021). Крім того, міжнародні організації, такі як Продовольча та сільськогосподарська організація (ФАО), надають технічну підтримку та рекомендації щодо політики для зміцнення глобальної стійкості аквакультури (ФАО, 2024). Регіональні альянси, такі як Азіатсько-Тихоокеанська комісія з рибальства (APFIC), також сприяють передачі знань та об'єднанню ресурсів, що дозволяє країнам застосовувати індивідуальні рішення для своїх унікальних викликів (APFIC, 2019). Глобальні партнерства можуть сприяти обміну знаннями та фінансуванню досліджень у галузі кліматично стійких практик аквакультури (Tett et al., 2011).

Динаміка ринку

Ринкові сили відіграють ключову роль у впровадженні практик сталого аквакультурного господарства. Зростаючий попит споживачів на екологічно чисті морепродукти створив економічні стимули для виробників впроваджувати сталі системи. Системи сертифікації, такі як ті, що пропонує Рада з управління аквакультурою (ASC), забезпечують ринкові переваги, підвищуючи конкурентоспроможність та прозорість для споживачів, сприяючи переходу всієї галузі до сталого розвитку (Bush et al., 2013). Ці сертифікати в поєднанні з освітніми кампаніями, що підкреслюють екологічні переваги практик, адаптованих до кліматичних змін, таких як системи рециркуляційної аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA), значно впливають на купівельну поведінку, сприяючи переходу ринку до екологічно чистих морепродуктів (Potts et al., 2021). Крім того, цифрові технології, включаючи блокчейн, трансформують ланцюг постачання морепродуктів, забезпечуючи простежуваність, сприяючи довірі та гарантуючи відповідальність серед споживачів і виробників (Probst, 2020). Завдяки інтеграції схем сертифікації, освітніх заходів та технологічних досягнень галузь аквакультури поступово наближається до цілей сталого розвитку, забезпечуючи як екологічні, так і економічні переваги.

Механізми зменшення ризиків та страхування

У міру зростання частоти та інтенсивності кліматичних ризиків, таких як екстремальні погодні явища та спалахи захворювань, для захисту аквакультурних господарств критично важливими є надійні стратегії зменшення ризиків та індивідуальні механізми страхування. Страхові продукти, розроблені спеціально для аквакультури, такі як страхування врожаю



аквакультурних видів або параметричне страхування від пошкоджень, пов'язаних з погодою, можуть забезпечити фінансову безпеку операторам. Для розробки доступних та недорогих страхових схем необхідна співпраця між урядами, фінансовими установами та страховими компаніями. Наприклад, параметричні страхові програми на Філіппінах успішно забезпечили виплати рибоводам, які постраждали від тайфунів, що дозволило швидко відновити та продовжити діяльність (Van Anrooy et. al., 2022). Інструменти оцінки ризиків, такі як кліматичне моделювання та системи раннього попередження, ще більше підвищують стійкість, допомагаючи операторам передбачати та зменшувати потенційні перебої (Allison et al., 2009).

Підсумок

Вплив глобального потепління на аквакультуру підкреслює необхідність стратегічного вибору систем та сталого розвитку для забезпечення довгострокової стійкості та продуктивності галузі. У міру того, як кліматичні виклики, такі як підвищення температури, підкислення океану та поширення хвороб, продовжують посилюватися, впровадження інноваційних та адаптивних систем аквакультури стає необхідністю. У цьому розділі висвітлено найважливіші підходи, включаючи системи рециркуляційної аквакультури (RAS), інтегровану мультитрофічну аквакультуру (IMTA) та морську аквакультуру, як життєздатні рішення для пом'якшення цих викликів.

Системи рециркуляційної аквакультури (RAS) забезпечують точний контроль навколишнього середовища, що дозволяє підприємствам витримувати зовнішні кліматичні коливання, одночасно зменшуючи залежність від зовнішніх джерел води. Інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA) сприяє переробці поживних речовин та стабільності екосистеми, пропонуючи цілісний підхід до сталого розвитку. Морська аквакультура, що працює в більш глибоких і стабільних водах, мінімізує вплив прибережної евтрофікації та гіпоксії, забезпечуючи ефективну альтернативу для розширення виробництва..

Перехід до цих систем вимагає комплексних політичних рамок та фінансових стимулів для подолання бар'єрів, пов'язаних з високими початковими витратами. Уряди, приватні зацікавлені сторони та міжнародні організації повинні співпрацювати за допомогою таких механізмів, як міжнародні угоди, програми фінансування та платформи для обміну знаннями. Конкретні заходи, включаючи субсидії, податкові пільги та гранти, будуть мати вирішальне значення для заохочення інвестицій у технології, стійкі до кліматичних змін, особливо для дрібних фермерів, які є найбільш вразливими до кліматичних потрясінь.

Поінформованість споживачів та ринковий попит на екологічно стійкі морепродукти створюють додаткові можливості для трансформації галузі. Системи сертифікації та екологічні маркування можуть стимулювати виробників до впровадження кліматично стійких практик, одночасно сприяючи довірі та прозорості серед споживачів. Освітні кампанії та глобальне масштабування цих ініціатив можуть ще більше посилити їхній вплив, особливо в регіонах з високим потенціалом аквакультури. Використання таких технологій, як блокчейн,

для відстеження ланцюгів постачання також відіграватиме важливу роль у зміцненні довіри споживачів

З огляду на майбутнє, інвестиції в дослідження та розробки мають вирішальне значення для інновацій та вдосконалення систем аквакультури. Пріоритетними напрямками є підвищення енергоефективності систем RAS, розробка недорогих систем ІМТА та вдосконалення стратегій боротьби з патогенами. Довгостроковий моніторинг навколишнього середовища та проактивні стратегії управління забезпечать адаптивність до мінливих реалій зміни клімату.

Завдяки інтеграції технологічних досягнень та екологічних принципів сектор аквакультури може підвищити свою стійкість та сталість. Політики, дослідники та зацікавлені сторони галузі повинні діяти рішуче, щоб впровадити системи, які забезпечать довгострокову життєздатність сектору в умовах зміни клімату. Завдяки спільним зусиллям аквакультура може продовжувати процвітати, сприяючи глобальній продовольчій безпеці та економічному розвитку в епоху зміни клімату.

Список використаних джерел

- Abolofia, J., Asche, F., & Wilen, J. E. (2017). The cost of lice: Quantifying the impacts of parasitic sea lice on farmed salmon. *Marine Resource Economics*, 32(3), 329–349.
- Allison, E. H., Perry, A. L., Badjeck, M. C., Adger, W. N., Brown, K., Conway, D., ... & Dulvy, N. K. (2009). Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries. *Fish and Fisheries*, 10(2), 173–196.
- Aly, S. M., & Fathi, M. (2024). Advancing aquaculture biosecurity: A scientometric analysis and future outlook for disease prevention and environmental sustainability. *Aquaculture International*, 32(7), 8763–8789.
- Asia-Pacific Fishery Commission. (2014). *Regional overview of aquaculture trends in the Asia-Pacific region*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26–35.
- Baltadakis, A. (2021). Investigating integrated multi-trophic aquaculture at different spatial scales.
- World Bank. (2013). *Fish to 2030: Prospects for fisheries and aquaculture* (Report No. 83177-GLB). World Bank.
- Bondad-Reantaso, M. G., et al. (2005). Disease and health management in Asian aquaculture. *Veterinary Parasitology*, 132(3–4), 249–272.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. John Wiley & Sons.
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., ... & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578–633.
- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., ... & Kusumawati, R. (2013). Certify sustainable aquaculture? *Science*, 341(6150), 1067–1068.
- Cooley, S. R., et al. (2009). Ocean acidification's potential to alter global seafood supply. *Oceanography*, 22(4), 172–181.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929.
- European External Action Service. (2021). *Horizon Europe strategic plan 2021–2024*. European Union. https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/horizon_europe_strategic_plan_2021-2024.pdf
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>

- FAO. (2024). *The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action*. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., ... & Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 173, 176–193.
- Froehlich, H. E., Gentry, R. R., & Halpern, B. S. (2018). Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature Ecology & Evolution*, 2(11), 1745–1750.
- Froehlich, H. E., Afflerbach, J. C., Frazier, M., & Halpern, B. S. (2019). Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*, 29(18), 3087–3093.
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M. C., & Allison, E. H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: A global perspective. *Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture. Final Technical Report, DFID, Stirling*, 151pp.
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: Perspectives, concerns, and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57–70.
- Manolache, A. I., & Andrei, G. (2024). A comprehensive review of multi-use platforms for renewable energy and aquaculture integration. *Energies*, 17(19), 4816.
- Martins, C. I., et al. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83–93.
- Munday, P. L., Dixon, D. L., Donelson, J. M., Jones, G. P., Pratchett, M. S., Devitsina, G. V., & Døving, K. B. (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1848–1852.
- Nielsen, R., Ankamah-Yeboah, I., & Llorente, I. (2021). Technical efficiency and environmental impact of seabream and seabass farms. *Aquaculture Economics & Management*, 25(1), 106–125.
- OECD. (2021). *Strengthening climate resilience: Guidance for governments and development co-operation*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/4b08b7be-en>
- Pereira, R., Yarish, C., & Critchley, A. T. (2024). Seaweed aquaculture for human foods in land-based and IMTA systems. In *Applications of seaweeds in food and nutrition* (pp. 77–99). Elsevier.
- Potts, J., Wilkings, A., Lynch, M., & McFatridge, S. (2021). *State of sustainability initiatives review: Standards and the blue economy*. International Institute for Sustainable Development.
- Pounds, J. A., et al. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161–167.
- Probst, W. N. (2020). How emerging data technologies can increase trust and transparency in fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1286–1294.
- Rahman, M. L., Shahjahan, M., & Ahmed, N. (2021). Tilapia farming in Bangladesh: Adaptation to climate change. *Sustainability*, 13(14), 7657.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589).
- Tett, P., et al. (2011). Defining and detecting undesirable disturbance in the context of marine eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2), 1147–1155.
- Tine, M., Kuhl, H., Gagnaire, P. A., Louro, B., Desmarais, E., Martins, R. S., ... & Reinhardt, R. (2014). European sea bass genome and its variation provide insights into adaptation to euryhalinity and speciation. *Nature Communications*, 5(1), 5770.
- Troell, M., et al. (2003). Integrated mariculture: Asking the right questions. *Aquaculture*, 226(1–4), 69–90.
- Yue, G. H., Ma, K. Y., & Xia, J. H. (2024). Status of conventional and molecular breeding of salinity-tolerant tilapia. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 271–286.



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

Van Anrooy, R., Espinoza Córdova, F., Japp, D., Valderrama, D., Karmakar, K. G., Lengyel, P., ... & Zhang, Z. (2022). *World review of capture fisheries and aquaculture insurance 2022* (Vol. 682). Food and Agriculture Organization.

Visch, W., Layton, C., Hurd, C. L., Macleod, C., & Wright, J. T. (2023). A strategic review and research roadmap for offshore seaweed aquaculture: A case study from southern Australia. *Reviews in Aquaculture*, 15(4), 1467–1479.

Глосарій

Адаптація – пристосування до змін довкілля, що відбувається шляхом природної еволюції або завдяки технологічним втручанням (наприклад, селекція на стійкість до високих температур).

Аеробний процес – хімічні або біологічні процеси, що відбуваються за наявності кисню.

Аквакультура – розведення, вирощування та збирання риби, ракоподібних, молюсків і водних рослин у контрольованих умовах.

Аквакультура морських водоростей – вирощування водоростей із метою поглинання CO₂, видалення поживних речовин і сталого виробництва їжі.

Анаеробні умови – середовища з дуже низьким або відсутнім киснем, наприклад, на дні ставків чи болотах.

Ацидифікація (закислення) – процес, за якого рН води знижується, роблячи її більш кислою.

Біобезпека – заходи, спрямовані на запобігання занесенню та поширенню шкідливих організмів.

Біофільтр – система фільтрації, що використовує живі організми (наприклад, бактерії) для розкладання відходів.

Біорізноманіття – різноманітність рослин, тварин і мікроорганізмів у певній території або екосистемі.

Вакцина – біологічний препарат, призначений для формування або підвищення імунітету.

Валова енергія – загальний вміст енергії в кормі.

Викиди вуглекислого газу – виділення CO₂ та інших парникових газів в атмосферу.

Водна екосистема – водне середовище, у якому живі організми взаємодіють між собою та з довкіллям.

Вуглецевий нейтралітет (Net zero) – баланс між кількістю парникових газів, що утворюються, і тією, що видаляється.

Вуглецевий слід – загальний обсяг парникових газів від діяльності людини.

Гіпоксія – стан низького вмісту розчиненого кисню у воді.

Глобальне потепління – підвищення середньої температури поверхні Землі через зростання концентрації парникових газів.



Добробут тварин – етичний підхід до умов утримання, здоров'я та поведінки водних тварин.

Денітрифікація – анаеробний процес, під час якого бактерії перетворюють нітрати у газоподібні форми азоту.

Дефіцит води – ситуація, коли водних ресурсів недостатньо.

Диференційна діагностика – розмежування кількох можливих захворювань для визначення справжньої причини.

Діагностика – встановлення природи захворювання; **діагностичний** – пов'язаний із діагностикою.

Еврігалінні види – організми, що можуть витримувати широкий діапазон солоності.

Евтрофікація – процес надмірного надходження поживних речовин у водойми, що призводить до цвітіння водоростей і дефіциту кисню.

Екосистемні послуги – користь, яку люди отримують від природних екосистем.

Цілісність екосистеми – здатність екосистеми зберігати структуру й функції.

Закіслення океану – зниження рН океанів через надмірне поглинання CO₂.

Зміна клімату – довготривалі глобальні або регіональні зміни клімату.

Інтегрована багатотрофічна аквакультура (ІМТА) – спільне вирощування різних видів для переробки поживних речовин.

Інфекція – проникнення та розмноження патогенних організмів.

Карантин – ізоляція чи обмеження руху для запобігання поширенню інфекцій.

Кисневе голодування – стан дуже низького або відсутнього розчиненого кисню у воді.

Клінічні ознаки – видимі симптоми хвороби.

Коефіцієнт ефективності корму – співвідношення приросту до кількості спожитого корму.

Коефіцієнт конверсії корму – кількість корму, необхідна для приросту маси.

Кругообіг поживних речовин – рух поживних елементів в екосистемі.

Метаболічна швидкість – швидкість використання енергії організмом.

МО-дієта – багатоцільова оптимізація.



Мертві зони – ділянки водного середовища з критично низьким рівнем кисню.

Навантаження поживними речовинами – надмірне надходження азоту та фосфору.

Нетто-енергія (Net energy) – енергія, доступна організму для використання.

Нітрифікація – аеробний процес перетворення амонію на нітрати.

Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment) – метод аналізу екологічних впливів.

Офшорна аквакультура – аквакультурні системи, розташовані далі від берега.

Парникові гази – гази, що затримують тепло в атмосфері.

Патоген – мікроорганізм, здатний спричиняти захворювання.

Препіотики – харчові добавки на основі клітковини.

Препіотичні добавки – продукти харчування, що слугують живленням для мікробіоти.

Пробіотики – живі мікроорганізми, що покращують мікрофлору кишечника.

Пробіотичні добавки – продукти або добавки з живими мікроорганізмами.

Резилієнтність (стійкість) – здатність виду чи екосистеми відновлюватися після стресу.

Рециркуляційні системи аквакультури (RAS) – замкнені системи з повторним використанням води.

Розумна аквакультура (Smart aquaculture) – використання передових технологій.

Секвестрація вуглецю – процес уловлювання й зберігання CO₂.

Селекція – процес відбору батьківських організмів із бажаними властивостями.

Селекція за маркерами – біотехнологічний метод відбору за генетичними маркерами.

Сталий менеджмент – методи збереження природних ресурсів у довгостроковій перспективі.

Стратегії пом'якшення – дії для зменшення негативних наслідків зміни клімату.

Тепловий стрес – фізіологічний стрес унаслідок температур води поза оптимумом.

Термальна стратифікація – утворення температурних шарів у водоймі.

Трансгенні види – генетично модифіковані організми.

Трофічні рівні – ієрархічні рівні харчового ланцюга.

УФ-стерилізація – використання ультрафіолету для знищення патогенів.

Фенотипова пластичність – здатність організму пристосовуватися до змін довкілля.

Фільтратори – водні організми, що відфільтровують дрібні частинки.

Цілісність екосистеми – здатність екосистеми зберігати структуру й функції.

Шкідливе цвітіння водоростей – швидке зростання водоростей, що виділяють токсини або знижують кисень.

Якість води – характеристики води, що визначають здоров'я й продуктивність організмів.

Спалах захворювання – швидке поширення хвороби.

CRISPR–Cas9 – інструмент редагування геному для поліпшення властивостей аквакультурних видів.

Vibrio spp. – група бактерій, що спричиняють хвороби у риб і креветок.