

# **Модуль 2. Вплив аквакультури на навколишнє середовище з точки зору глобального потепління**

**Професор Власта Бартулович, доктор філософії**

**Доцент Тетяна Доброславич, кандидат філософських наук**

**Університет Дубровника**

## **Вступ**

В умовах зміни клімату вплив аквакультури на навколишнє середовище викликає все більше занепокоєння, оскільки ця галузь сприяє викидам парникових газів, руйнуванню середовищ існування та виснаженню ресурсів. Викиди парникових газів, включаючи вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), закис азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ) та фторовані гази, значною мірою сприяють глобальному потеплінню, утримуючи тепло в атмосфері Землі. У той час як  $\text{CO}_2$  часто займає центральне місце,  $\text{CH}_4$  є дуже потужним парниковим газом, збільшення викидів якого спричинене діяльністю людини, такою як вирубка лісів, видобуток корисних копалин, спалювання біомаси та промислові процеси (Wróbel et al., 2023). Міжурядова група експертів з питань зміни клімату (МГЕЗК) підкреслила, що вплив людини на зміну клімату є незаперечним, а індустріалізація та урбанізація призводять до рекордних 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 індустрія аквакультури має важливе значення для продовольчої безпеки, вона також є значним джерелом викидів парникових газів. Енергоємні операції, зміна землекористування, виробництво кормів та управління відходами сприяють збільшенню вуглецевого сліду (MacLeod et al., 2019). Багато об'єктів аквакультури

покладаються на електроенергію з викопного палива, що збільшує викиди  $\text{CO}_2$ , особливо в регіонах, де вугілля, нафта та природний газ домінують у виробництві енергії (Vujas et al., 2022). Крім того, швидке розширення галузі призвело до перетворення середовища існування, особливо в екологічно чутливих районах, таких як мангрові зарості та водно-болотні угіддя, що сприяє втраті біорізноманіття та деградації екосистем (Barbier et al., 2011).

Одним з найбільших впливів аквакультури на довкілля є виробництво кормів, на яке припадає до 90 % викидів парникових газів у рибництві (FAO, 2022). Вирощування кормів, включаючи рибне борошно та інгредієнти рослинного походження, вимагає багато землі, води та енергії, що ще більше загострює екологічні проблеми. Крім того, аквакультура генерує значні відходи, включаючи нез'їдені корми, фекалії, побічні продукти метаболізму та хімічні залишки, які можуть впливати на якість води і порушувати водні екосистеми (Wu, 1995; Dalsgaard & Krause-Jensen, 2006; Holmer et al., 2008). Ступінь цього впливу варіюється залежно від місця розташування ферми, видів, що вирощуються, щільності поголів'я та ефективності кормів. Оскільки світовий попит на морепродукти продовжує зростати, нагальним завданням є узгодження зростання аквакультури з екологічною стійкістю. Сталі практики у використанні енергії, управлінні земельними ресурсами, виробництві кормів та переробці відходів мають важливе значення для мінімізації вуглецевого сліду галузі та забезпечення довгострокової екологічної життєздатності.

## 1. Викиди парникових газів

Викиди парникових газів (ПГ) суттєво впливають на атмосферу Землі, затримуючи тепло. До таких газів належать вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), закис азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ) та фторовані гази. Хоча  $\text{CO}_2$  часто обговорюється,  $\text{CH}_4$  також відіграє вирішальну роль у глобальному потеплінні. Антропогенна діяльність, така як перетворення водно-болотних угідь, захоронення відходів, будівництво дамб, спалювання біомаси, вирубка лісів, видобуток корисних копалин, а також газова та вугільна промисловість різко збільшили викиди  $\text{CH}_4$ . Незважаючи на коротший час життя в атмосфері,  $\text{CH}_4$  є набагато ефективнішим поглиначем тепла, ніж  $\text{CO}_2$  (Програма ООН з навколишнього середовища, 2022). Міжурядова група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) стверджує, що "вплив людини на кліматичну систему очевидний, а нещодавні антропогенні викиди парникових газів є найвищими в історії". Діяльність людини з часів промислової революції значно збільшила концентрацію цих газів, що призвело до підвищення глобальної температури та наслідків зміни клімату. Швидка індустріалізація та урбанізація багатьох регіонів ще більше посилили рівень викидів. Транспортний сектор, виробництво енергії та промислові процеси є значними джерелами викидів  $\text{CO}_2$ . Крім того, сільськогосподарський сектор, включаючи

тваринництво та рисові поля, є значним джерелом викидів  $\text{CH}_4$  та  $\text{N}_2\text{O}$ . Ці викиди мають далекосяжні наслідки, впливаючи на погодні умови, рівень моря та біорізноманіття. Світова індустрія аквакультури, хоча і є сталою альтернативою вилову дикої риби, є значним джерелом викидів парникових газів. Енергоємні операції, зміни у землекористуванні, виробництво кормів та управління відходами - все це сприяє збільшенню вуглецевого сліду аквакультури (MacLeod et al., 2019).

### **1.1. Джерела викидів парникових газів в аквакультурі**

Аквакультура переживає стрімке зростання в останні десятиліття і стала важливою частиною світового виробництва продуктів харчування. Оскільки попит на морепродукти зростає, аквакультура стала більш стійкою альтернативою традиційному тваринництву. Однак розширення аквакультури також несе з собою екологічні виклики, включаючи викиди парникових газів (ПГ), переважно оксиду азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ) та вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), внаслідок споживання кормів, сільськогосподарської енергії, добрив та метаболізму тварин (MacLeod et al., 2019).

Анаеробні умови в аквакультурних ставках сприяють утворенню  $\text{CH}_4$  через розпад органічних речовин у середовищах, позбавлених кисню (Pu et al., 2022). Крім того, викиди  $\text{N}_2\text{O}$  пов'язані з мікробною активністю в середовищах, багатих на азот, наприклад, в результаті надмірного внесення добрив або кормів (Bano et al., 2024).

### **1.2. Викиди закису азоту та їх вплив**

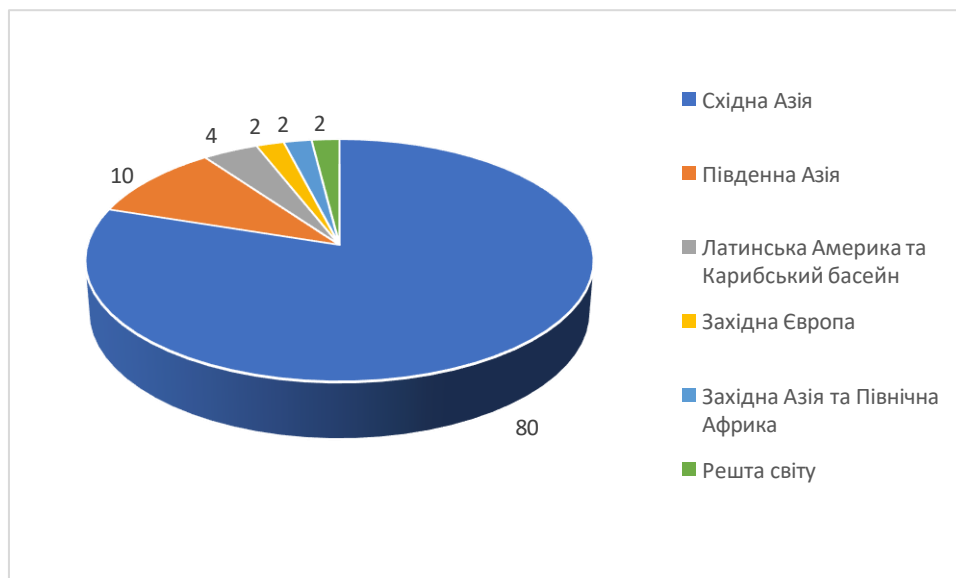
$\text{N}_2\text{O}$  в основному утворюється внаслідок мікробного перетворення азоту в ґрунтах під час вирощування сільськогосподарських культур, а також внаслідок мікробного перетворення азотистих сполук з кормів та добрив у ставках аквакультури (MacLeod et al., 2019). МГЕЗК (2007) повідомила про збільшення концентрації  $\text{N}_2\text{O}$  та  $\text{CH}_4$  з часів індустріалізації, що викликає занепокоєння, оскільки обидва гази, хоча і присутні в менших концентраціях, ніж вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), мають у 298 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) та 25 ( $\text{CH}_4$ ) разів більший потенціал глобального потепління, ніж  $\text{CO}_2$ , протягом 100-річного періоду часу. Швидкість утворення  $\text{N}_2\text{O}$  визначається низкою фізико-хімічних факторів, таких як температура, солоність і рН, які можуть змінюватися сезонно. Збільшення викидів  $\text{N}_2\text{O}$  від аквакультури було зафіксовано в системах рибництва з високою щільністю, особливо в Азії, де розширення аквакультури є найбільш значним (FAO, 2020). Дослідження показують, що навіть маломасштабна аквакультура може сприяти викидам  $\text{N}_2\text{O}$ , порівнянним з викидами від сільськогосподарської діяльності (Rahman et al., 2022).

### **1.3. Викиди вуглекислого газу та метану в аквакультурі**

Викиди CO<sub>2</sub> відбуваються внаслідок споживання енергії перед початком роботи (переважно пов'язаної з виробництвом кормів та добрив), споживання енергії під час роботи (наприклад, перекачування води, споживання електроенергії, використання інших видів палива), а також розподілу та переробки після завершення роботи. Викиди CO<sub>2</sub> також є результатом змін у надземних та підземних запасах вуглецю, спричинених землекористуванням та змінами у землекористуванні (ЗЗК) (перетворення пасовищ на орні землі). CH<sub>4</sub>, який в основному утворюється в результаті анаеробного розкладання органічної речовини при вирощуванні затопленого рису, також може утворюватися в результаті поведінки з відходами рибних господарств. (MacLeod, 2019). Рибницькі ферми генерують органічні відходи, включаючи нез'їдені корми, екскременти риб та інші побічні продукти. Коли ці матеріали розкладаються в анаеробному середовищі, наприклад, у донних відкладах або погано керованих відстійниках, виділяється метан (CH<sub>4</sub>) (Pu et al., 2022).

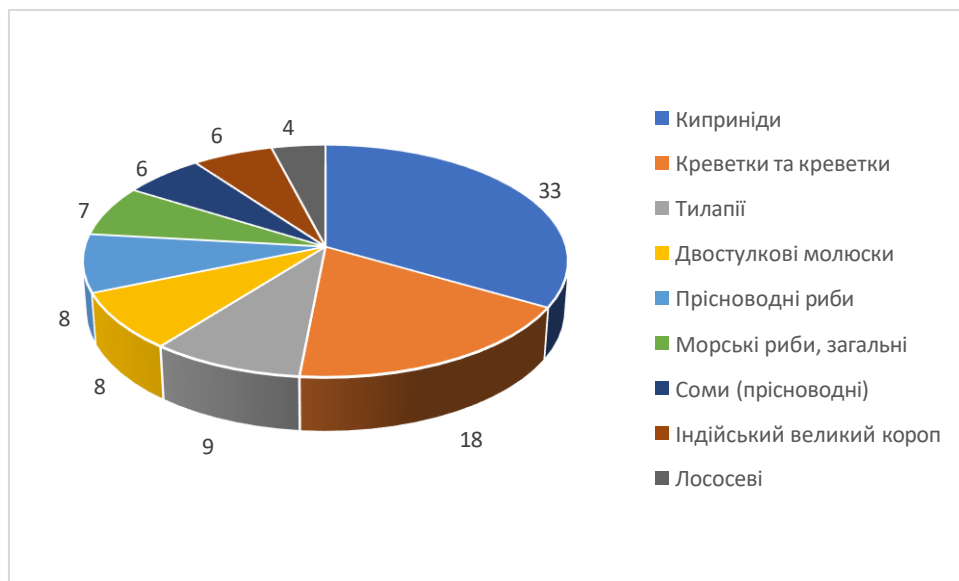
#### 1.4. Викиди парникових газів у світовій аквакультурі

MacLeod та ін. (2019) дослідили викиди парникових газів у глобальній аквакультурі - складному секторі, що складається з багатьох різних видів, які вирощуються в різних системах і середовищах. Аналіз зосереджений на основних групах культивованих водних видів, за винятком морських рослин. Китай є найбільшим у світі виробником і споживачем водної продукції, а його сектор аквакультури відіграє ключову роль у забезпеченні глобальної продовольчої безпеки (FAO, 2020). У 2023 році рибний сектор Індонезії переживає значне зростання, його внесок у валовий внутрішній продукт (ВВП) країни становить близько 3,2% (Sulistijowati et al., 2023). Загалом, Східна та Південна Азія є найбільшими у світі виробниками парникових газів, на які припадає 90% загального обсягу виробництва (Рис. 1).



*Рисунок 1. Відсоткова частка загальних викидів парникових газів за регіонами .  
Джерело: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Matun-Ur-Rashid, M. 2019.  
Кількісна оцінка та пом'якшення викидів парникових газів від світової аквакультури.  
Технічний документ ФАО з питань рибальства та аквакультури № 626. Рим, ФАО.*

Якщо проаналізувати дані для різних видів, стає зрозуміло, що на виробництво ципринід припадає найбільша частка викидів парникових газів - 33%, за ним слідує аквакультура креветок і креветок - 18%. Інтенсивні креветочні ставки, зокрема, мають вищу продуктивність, а також спричиняють значний вплив на навколишнє середовище, особливо в прибережних регіонах, оскільки вони виробляють велику кількість метану через анаеробні умови, які часто переважають на мулистому дні ставків (Рис. 2).



*Рисунок 2. Відсоткова частка загальних викидів парникових газів за групами видів.  
Джерело: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Matun-Ur-Rashid, M. 2019.  
Кількісна оцінка та пом'якшення викидів парникових газів від світової аквакультури.  
Технічний документ ФАО з питань рибальства та аквакультури № 626. Рим, ФАО.*

Після різних газів та їхніх джерел, виробництво водних кормів має найбільший вплив - 55% усіх парникових газів. Використання енергії в сільському господарстві та водний  $N_2O$  також мають значну частку (Рисунок 3).

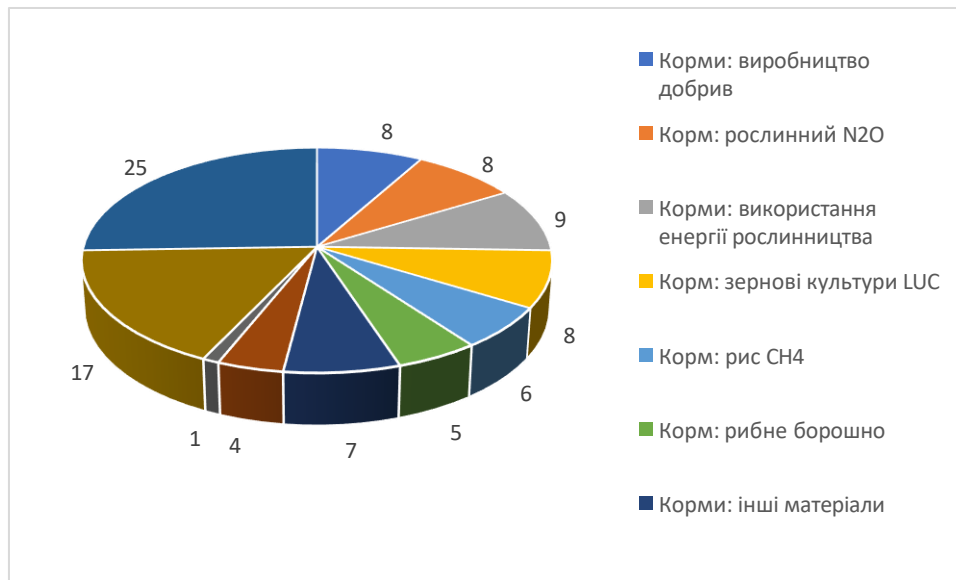


Рисунок 3: Відсоткова частка викидів парникових газів за категоріями джерел. Джерело: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Matun-Ur-Rashid, M. 2019. Кількісна оцінка та пом'якшення викидів парникових газів від світової аквакультури. Технічний документ ФАО з рибальства та аквакультури № 626. Рим, ФАО.

## 2. Використання енергії

Вуглецевий слід аквакультури безпосередньо пов'язаний з джерелами енергії, що використовуються. У багатьох регіонах аквакультура покладається на електроенергію, вироблену з викопних видів палива, що призводить до викидів значної кількості CO<sub>2</sub> в атмосферу. Вуглецева інтенсивність виробництва електроенергії варіюється залежно від енергетичного балансу конкретного регіону. У районах, де електроенергія переважно виробляється з вугілля, нафти або природного газу, вуглецевий слід аквакультури може бути значним. Використання викопного палива для виробництва енергії в аквакультурі безпосередньо впливає на викиди парникових газів. Викиди вуглецю від використання енергії в аквакультурі можуть бути значними, особливо для великих, енергоємних операцій (Li, H. et al., 2024).

### 2.1. Енергія та сталість в аквакультурі

Незважаючи на важливість аквакультури для виробництва продуктів харчування, існує занепокоєння щодо її розширення (Naylor et al., 2000). Деякі з екологічних проблем, пов'язаних з аквакультурою, стосуються виробництва кормів та викиду багатих на поживні речовини стічних вод у навколишнє середовище внаслідок метаболізму тварин (Thomas et al., 2021). Екологічна стійкість продуктів, процесів або

послуг часто оцінюється за допомогою оцінки життєвого циклу (ОЖЦ), яка є методологією, визначеною стандартами ISO 14040 та 14044 (ISO, 2006a, 2006b), для кількісної оцінки потенційного впливу на екосистеми, здоров'я людей та природні ресурси, спричиненого продуктами та системами протягом усього їхнього життєвого циклу (Cucurachi et al., 2019). Використання енергії в аквакультурі має важливе значення для підтримки умов, необхідних для росту вирощуваних видів, таких як циркуляція води, аерація, регулювання температури та годівля (Таблиця 1).

Таблиця 1. Використання енергії на різних етапах аквакультурних операцій

Діяльність у сфері аквакультури	Потреба в енергії
Інкубатори та розплідники	регулювання температури, освітлення та циркуляції води.
Системи ставків і резервуарів	Аерація, перекачування та фільтрація
Рециркуляційні системи аквакультури (RAS)	Очищення води та регулювання температури
Клітинні та офшорні системи	Човновий транспорт, системи годівлі та збирання врожаю
Виробництво та переробка кормів	Енергоємні закупівлі, виробництво та транспортування інгредієнтів

Однак ці енергетичні потреби, особливо якщо вони пов'язані з використанням викопного палива, сприяють викидам вуглецю, які посилюють глобальне потепління. Оскільки галузь продовжує розширюватися, розуміння та пом'якшення пов'язаного з енергією впливу аквакультури на навколишнє середовище має вирішальне значення для забезпечення її довгострокової стійкості. Для досягнення сталості в аквакультурі дуже важливо збалансувати вплив на навколишнє середовище зі споживанням енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в аквакультуру може значно скоротити викиди парникових газів (Таблиця 2).

Таблиця 2. Первинні джерела енергії в аквакультурі

Джерела енергії	Б/в
Викопне паливо (дизельне паливо, вугілля, природний газ)	генератори, транспорт та виробничі потужності.
Електрика	Переважно з невідновлюваних джерел, що живлять водяні насоси, системи аерації та охолодження.

Розподіл системи землеробства і, врешті-решт, вибір видів з нижчими вимогами до якості кормів і води може зменшити як вплив на навколишнє середовище, так і



використання енергії. Енергетичні витрати на виробництво включають не лише питання сталого розвитку, пов'язані з ефективністю використання екосистемних ресурсів та виснаженням невідновлюваних ресурсів, але й потенційні витрати для майбутніх суспільств через зміну навколишнього середовища внаслідок забруднення та глобальної зміни клімату (FAO, 2022; Parker et al., 2018).

## **2.2. Енергоємні види діяльності в аквакультурі**

Аквакультура є дуже енергоємною галуззю, в якій різні операції вимагають значної кількості енергії для створення оптимальних умов для видів, що вирощуються. Ці операції включають циркуляцію води, аерацію, контроль температури і системи годівлі, які необхідні для забезпечення росту і здоров'я водних організмів. Споживання енергії, пов'язане з цією діяльністю, варіюється в залежності від масштабу операції та видів, що вирощуються.

Циркуляція та аерація води: Підтримання належного рівня кисню в аквакультурних об'єктах має вирішальне значення для здоров'я і виживання риби та моллюсків. Системи аерації зазвичай використовуються для підвищення рівня кисню у воді, особливо в умовах інтенсивної аквакультури, коли велика кількість організмів вирощується в обмеженому просторі. Ці системи вимагають значної кількості енергії, особливо на великих підприємствах. Системи циркуляції води також використовуються для забезпечення рівномірного розподілу кисню, поживних речовин і продуктів життєдіяльності у воді, що ще більше збільшує енергоспоживання (Tacon & Metian, 2009).

Контроль температури: Температура відіграє важливу роль у рості та метаболізмі водних організмів. У деяких регіонах аквакультурні підприємства повинні регулювати температуру води, щоб створити оптимальні умови для вирощування видів. Це особливо актуально в холодному кліматі або при розведенні тропічних видів у помірних регіонах. Регулювання температури часто вимагає використання енергоємних систем, таких як нагрівачі, охолоджувачі та теплообмінники. Ці системи важливі для підтримки води в ідеальному температурному діапазоні для росту і розмноження, але вони також сприяють високому енергоспоживанню (Boyd & McNevin, 2015).

Системи годівлі: Автоматизовані системи годівлі широко використовуються в аквакультурі для оптимізації ефективності годівлі та мінімізації відходів. Ці системи працюють від електрики і використовуються для контрольованого розподілу корму серед великої кількості риб або моллюсків. Хоча автоматизовані системи годівлі можуть покращити конверсію корму та загальну продуктивність аквакультури, вони



також сприяють збільшенню енергетичних потреб (Matulić et al., 2020).

### 3. Зміна землекористування та перетворення оселищ

Оскільки світовий попит на рибу та морепродукти продовжує зростати, поєднання зростання аквакультури з екологічною стійкістю є серйозним викликом. Стрімке розширення аквакультури призвело до значних змін у землекористуванні та перетворенні середовищ існування, особливо впливаючи на екологічно цінні екосистеми, такі як мангрові зарості, водно-болотні угіддя та прибережні райони. Ці зміни призводять до втрати біорізноманіття, викидів вуглецю та загальної деградації екосистем, що викликає занепокоєння щодо довгострокової життєздатності аквакультури (Barbier et al., 2011).

#### 3.1. Знищення мангрових заростей та викиди вуглецю

Втрата або деградація середовищ існування, зокрема прибережних середовищ існування, таких як мангрові зарості та інші водно-болотні угіддя (луки з морської трави, солончаки, прибережні лагуни, естуарії), є одним з основних негативних наслідків аквакультури (Wu 1995; Dev 1998; Naylor et al. 2000; Pérez-Osuna 2001; Ruiz et al. 2001; Pérez et al. 2008). Мангрові ліси, які мають вирішальне значення для прибережних екосистем, є найважливішим джерелом органічної речовини в цих середовищах (Tidwell & Allan, 2001). Вони також слугують критично важливими місцями розмноження для численних економічно важливих водних видів, а також місцями гніздування і відпочинку для багатьох інших груп (Paez-Osuna, 2005). Крім того, мангрові зарості сприяють захисту узбережжя, утримуючи відкладення, забруднюючі речовини, азот і вуглець та зменшуючи ерозію (Alongi, 2002; Walters et al., 2008). Однак темпи вирубки мангрових лісів оцінюються в 1-2 % на рік, причому основною причиною втрати мільйонів гектарів мангрових лісів у таких країнах, як Таїланд, Індонезія, Еквадор і Мадагаскар, є аквакультура креветок і риби (Naylor et al., 2000; Harper et al., 2007). Дослідження, проведені на морських садкових фермах на узбережжі Середземного моря, показали знищення/деградацію луків *Posidonia oceanica* внаслідок високого органічного та поживного навантаження від рибогосподарської діяльності. Перетворення мангрових лісів на креветочні ферми (Dev 1998; Choo 2001; Pérez-Osuna 2001) головним чином призвело до втрати кормів, розплідників, притулків і нерестилищ для широкого спектру морських і наземних тварин (Ruiz та ін. 2001; Pérez та ін. 2008), а також втрати природного захисту від повеней, штормів і ураганів (Dev 1998; Choo 2001; Pérez-Osuna 2001).

Знищення мангрових лісів задля аквакультури не лише позбавляє їх здатності

накопичувати вуглець, але й вивільняє накопичений вуглець з ґрунту в атмосферу. За даними Alongi (2015), перетворення мангрових лісів на креветочні ферми призводить до значного збільшення викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Оскільки мангрові ліси є одними з найбільш вуглецевоємних екосистем на планеті і можуть зберігати до п'яти разів більше вуглецю на гектар, ніж тропічні ліси, їх втрата є критичною екологічною проблемою (Barbier et al., 2011). Окрім 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 et al., 2011).

### **3.2. Перетворення водно-болотних угідь та сільськогосподарських земель**

Розширення аквакультури у внутрішніх водоймах також призвело до значних змін у землекористуванні, зокрема, через перепрофілювання сільськогосподарських земель та водно-болотних угідь під аквакультуру. Завдяки економічним перевагам аквакультури, яка часто приносить вищі фінансові прибутки, ніж традиційне сільське господарство, таке перепрофілювання спричиняє низку екологічних проблем (Ahmed & Thompson, 2019). Однією з основних проблем є руйнування екосистем, оскільки водно-болотні угіддя, важливі для фільтрації води, боротьби з повенями та біорізноманіттям, осушуються, щоб звільнити місце для аквакультурних ставків. Це призводить до втрати біорізноманіття та погіршує здатність ландшафту справлятися зі змінами навколишнього середовища.

Рахман та ін. (2022) показують, що перетворення сільськогосподарських земель на аквакультурні площі призводить до значної і часто незворотної екологічної шкоди, підкреслюючи необхідність сталого землекористування. Крім того, інтенсивна аквакультура може призвести до накопичення органічних відходів, хімічних речовин та надлишку поживних речовин у ґрунті та воді, що призводить до евтрофікації. Цей процес, що характеризується надмірною кількістю поживних речовин, призводить до цвітіння водоростей і виснаження кисню та має серйозні наслідки для водних екосистем (Boyd et al., 2020).

### **3.3. Фрагментація оселищ та втрата біорізноманіття**

Розширення аквакультури призвело до фрагментації оселищ, що порушує екологічний зв'язок і ускладнює міграцію, розмноження та доступ видів до харчових ресурсів. Така фрагментація може призвести до скорочення чисельності популяцій та

втрати біорізноманіття. Інтродукція чужорідних видів з метою розведення посилює ці наслідки, оскільки вони конкурують з місцевими видами або знищують їх, ще більше дестабілізуючи екосистеми (Chavez et al., 2020).

Нещодавні дослідження показують глибокий вплив фрагментації оселищ на біорізноманіття (Maggiore et al., 2023). Перетворення сільськогосподарських угідь на аквакультурні площі призвело до постійних екологічних змін, що підкреслює важливість сталих практик при таких переходах (Rahman et al., 2022). Руйнування оселищ призводить до зменшення чисельності популяцій і фрагментації ареалів видів, порушуючи переміщення особин між ділянками оселищ і зменшуючи їхні шанси на виживання (Haddad et al., 2015).

## **4. Виробництво кормів та використання ресурсів**

Виробництво кормів для аквакультури є важливим аспектом галузі, але воно має значний вплив на навколишнє середовище. Вирощування кормових інгредієнтів, таких як рибне борошно та інгредієнти рослинного походження, вимагає значних природних ресурсів, таких як земля, вода та енергія. Це призводить до викидів парникових газів та погіршення стану навколишнього середовища. За оцінками, до 90% викидів парникових газів від рибних господарств пов'язано з виробництвом кормів для аквакультури (FAO, 2022). Оскільки попит на продукцію аквакультури зростає, сталі практики виробництва кормів мають вирішальне значення для мінімізації впливу на навколишнє середовище та забезпечення довгострокової стійкості галузі.

### **4.1. Корми для аквакультури та альтернативні джерела**

В аквакультурі використовуються різні види кормів для задоволення харчових потреб вирощуваної риби і морепродуктів, а також для забезпечення росту і здоров'я тварин. Традиційно рибне борошно є основним компонентом кормів для аквакультури. Рибне борошно отримують з дрібних пелагічних риб, таких як анчоуси та сардини. Однак через занепокоєння щодо надмірного вилову риби, виснаження ресурсів та стійкості морських екосистем, інтерес до альтернативних джерел корму зріс (Tacon & Metian, 2009).

У відповідь на ці виклики галузь досліджує альтернативні кормові інгредієнти. Рослинні білки, такі як соя, кукурудза та пшениця, є одними з найбільш часто досліджуваних варіантів. Ці інгредієнти розглядаються як потенційна заміна рибному борошну і використовуються в кормах для аквакультури, щоб зменшити залежність від морських ресурсів (Duarte et al., 2020; O'Flynn et al., 2021). Крім того, білки на основі комах, наприклад, солдатських мух та борошняних черв'яків, нещодавно

з'явилися як перспективна альтернатива. Ці комахині білки можна вирощувати на органічних відходах, і вони є потенційним рішенням для зменшення потреби в перепрофілюванні земель та мінімізації впливу на навколишнє середовище (Freda et al., 2022).

Загалом, пошук альтернативних кормових інгредієнтів відображає зростаюче усвідомлення необхідності поєднання рибного господарства та сталого розвитку. Таке перетворення джерел кормів має на меті зменшити залежність від морських ресурсів, зберігаючи при цьому поживну якість кормів для вирощуваних видів риб.

## **4.2. Вплив виробництва кормів в аквакультурі на навколишнє середовище**

### **4.2.1. Вплив рослинних кормів на навколишнє середовище**

Заміна рибного борошна рослинними інгредієнтами, такими як соя та кукурудза, зменшує тиск на морські екосистеми, але створює нові екологічні проблеми (Tacon & Metian, 2009). Зростаючий попит на ці альтернативи призвів до широкомасштабної трансформації земель, особливо в тропічних регіонах, для задоволення зростаючого попиту на сільськогосподарські ресурси (Fargione та ін., 2023). Ця зміна у землекористуванні призвела до значних екологічних наслідків, включаючи вирубку лісів, втрату оселищ та зменшення біорізноманіття. Особливо страждають тропічні ліси, оскільки великі площі розчищаються для вирощування таких культур, як соя і кукурудза, які є важливими для виробництва кормів для тварин (Fargione et al., 2023).

### **4.2.2. Вплив на зміну клімату та викиди парникових газів**

Окрім перепрофілювання земель, вплив рослинництва на довкілля поширюється і на посилення зміни клімату через викиди парникових газів. Перетворення лісів на сільськогосподарські угіддя для виробництва кормів для тварин робить значний внесок у викиди вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ). Це відбувається не лише безпосередньо через втрату накопичення вуглецю в лісах, а й через енергоємні процеси, пов'язані з розчищенням та транспортуванням (Soussana et al., 2021). Крім того, використання синтетичних добрив і пестицидів при вирощуванні сільськогосподарських культур призводить до виділення закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), потужного парникового газу, який посилює глобальне потепління (Pardoe et al., 2022). Ці викиди дестабілізують як місцевий, так і регіональний клімат і роблять галузь аквакультури більш вразливою

до кліматичних викликів.

### **4.2.3. Деградація земель, водоспоживання та сільськогосподарське біорізноманіття**

Як ключовий компонент багатьох кормів для аквакультури, соя стала значним чинником різних екологічних проблем, зокрема, деградації ґрунтів, надмірного споживання води та втрати сільськогосподарського біорізноманіття (Magrin et al., 2020). Швидке поширення монокультур сої викликало занепокоєння щодо ерозії ґрунтів, вимивання поживних речовин та підвищеної вразливості до шкідників і хвороб. Ці проблеми часто вимагають збільшення використання хімічних добрив і пестицидів, що ще більше посилює шкоду навколишньому середовищу. Такі практики сприяють забрудненню та евтрофікації води, завдаючи шкоди як прісноводним, так і морським екосистемам (Pardoe et al., 2022). Крім того, знищення цінних екосистем, таких як водно-болотні угіддя та ліси, для розширення сільськогосподарського виробництва порушує місцеві вуглецеві цикли, знижує здатність ландшафту адаптуватися до зміни клімату та підвищує вразливість до екстремальних погодних явищ, таких як повені та посухи (Fargione et al., 2023).

### **4.2.4. Вуглецевий слід та споживання енергії**

Окрім змін у землекористуванні, важливим джерелом викидів парникових газів є великомасштабні сільськогосподарські процеси з виробництва кормів (Soussana et al., 2021). Енергоємні процеси, пов'язані з перепрофілюванням земель, а також високий попит на добрива та транспорт, призводять до значного вуглецевого сліду. Крім того, переробка рослинної сировини на корм для риб часто пов'язана з енергоємними процесами, що посилює вплив на навколишнє середовище. Ця проблема є особливо серйозною, коли у виробничих процесах використовується викопне паливо. Як наслідок, ці екологічні виклики підкреслюють занепокоєння щодо довгострокової стійкості рослинних кормових альтернатив в умовах глобальної зміни клімату.

## **4.3. Вибір кормів та годівля в аквакультурі**

### **4.3.1. Фактори, що впливають на вибір корму**

Вибір корму для вирощуваних риб і ракоподібних залежить від декількох факторів, включаючи харчові звички виду (травоїдні, всеїдні або м'ясоїдні), ринкову цінність виду і використовувану систему вирощування. Система вирощування, будь то земляний ставок, вольєр, загін або клітка, також впливає на вибір корму. Інтенсивні

системи потребують спеціально розроблених кормів для оптимізації росту та коефіцієнта перетворення корму (FCR), тоді як екстенсивні системи можуть більше покладатися на природні харчові організми (Tacon et al., 2013).

#### **4.3.2. Економічні та екологічні міркування при виборі кормів**

Іншим ключовим фактором є доступність комерційних кормів. Якщо вони недоступні або не підходять, фермери можуть використовувати корми власного виробництва, виготовлені з місцевих інгредієнтів, таких як низькосортна риба або побічні продукти сільського господарства. Фінансові ресурси фермера, такі як вартість кормів, зберігання та робоча сила, відіграють важливу роль у цьому процесі прийняття рішень (Tacon та ін., 2013). Погані стратегії годівлі, такі як перегодовування, можуть призвести до втрати поживних речовин і забруднення навколишнього середовища. Тому управління годівлею повинно також забезпечувати баланс між економічною ефективністю та екологічною стійкістю (White, 2013).

#### **4.3.3. Якість кормів та ефективність використання кормів**

Важливим питанням в аквакультурі є задоволення потреб риби в поживних речовинах шляхом відповідного раціонування кормів, що оптимізує ріст і FCR. Потреба в енергії та поживних речовинах у різних видів риб може змінюватися щодня, сезонно та від виду до виду. Незбалансовані раціони, недогодовування або перегодовування можуть знизити ефективність виробництва і сприяти погіршенню стану навколишнього середовища, особливо при вирощуванні в садках (Bureau, et al., 2006; Thorpe and Cho, 1995). Для мінімізації втрат і досягнення як економічної, так і екологічної стійкості необхідні відповідні стратегії управління кормами (Talbot, Corneillie and Korsøen, 1999; Cho and Bureau, 1998).

#### **4.3.4. Надмірний вилов риби**

Експлуатація диких ресурсів та біорізноманіття для виробництва кормів для аквакультури, а також для забезпечення насінням та плідниками може завдати значної шкоди водним екосистемам (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001). Дикі види риб, що мають низьку комерційну цінність, такі як японський анчоус і скумбрія, часто використовуються як корм для хижих риб або як додатковий корм для таких видів, як креветки, тилапія і молочна риба. Така практика створює додатковий тиск на вже переловлені запаси дикої риби. Вилучення дикорослих риб, таких як вугор, групер, жовтохвіст і тунець, ще більше сприяє виснаженню природних популяцій.

Збір насіння дикорослих креветок і молюсків є особливо шкідливим, оскільки він не лише загрожує цільовим видам, але й вбиває нецільові організми, такі як інші види креветок, макрозоопланктон і молодь риби та молюсків. Порушення харчової мережі впливає на широкий спектр організмів, включаючи водоплавних птахів, рептилій і ссавців, що призводить до збільшення смертності і зниження успішності розмноження (Choo, 2001). Крім того, вилучення диких видів може призвести до генетичної деградації місцевих популяцій і руйнування природних середовищ існування, що призведе до подальшого порушення водної екосистеми (Dev, 1998). Ця проблема є особливо важливою для видів, що інтенсивно виловлюються, і тих, що мають низьку репродуктивну здатність. Доки вирощування маточного стада в неволі є дорогим, закупівля диких нерестовищ, ймовірно, продовжуватиметься і завдаватиме подальшої шкоди навколишньому середовищу (Nash, 2005).

## 5. Відходи

Об'єкти аквакультури можуть генерувати значні обсяги відходів/стоків, що містять різноманітні речовини, такі як тверді частинки (переважно від нез'їденого корму та фекалій), розчинені продукти метаболізму (внаслідок виділення через зябра та нирки) та різні форми хімічних речовин (наприклад, терапевтичні препарати, добрива, важкі метали), з небажаними наслідками для довкілля (Wu 1995; Dev 1998; Pérez-Osuna 2001; Read and Fernandes 2003). Вплив на навколишнє середовище твердих частинок і розчинених органічних і неорганічних речовин (Таблиця 3) є особливо важливим, оскільки ці сполуки потрапляють безпосередньо в навколишнє середовище і впливають як на товщу води, так і на осадові відкладення (Dalsgaard & Krause-Jensen 2006; Holmer et al. 2007). Ступінь цього впливу залежить, головним чином, від розташування ферми, виду тварин, типу культури, щільності поголів'я, засвоюваності кормів та інших факторів, таких як практика годівлі та стан здоров'я тварин (Wu 1995).

Таблиця 3. Рушійні сили, тиск, стан, вплив та реакція на гіпотетичний розвиток аквакультури (Serpa & Duarte, 2008)

Водій	Тиск	Держава	Вплив	Відповідь
Рибництво	Збільшення потоку поживних речовин	Підвищений вміст поживних речовин та органіки концентрації речовини	Збільшення фітопланктону біомаса/евтрофікація	Виробництво морських водоростей для видалення надлишок поживних речовин



Збільшення потоків органічної речовини Зниження рівня кисню і кисню	Зниження рівня кисню. Накопичення органічних речовин в осадових породах	Вища смертність бентосу організмів/зменшення кількості бентосу різноманітність	Нижня аерація
Збільшення сили лобового опору	Зменшення протікання та збільшення часу перебування в країні	Збільшення відкладення осаду	Перерозподіл в райони з більш інтенсивна гідродинаміка
Вивільнення ксенобіотиків	Біоконцентрація	Підвищена смертність від нецільових захворювань види	Менш інтенсивне землеробство до зменшити поширення хвороб

Метеорологічні (наприклад, вітрові режими), гідрографічні (наприклад, батиметрія, течії, приливно-відливний режим, хвильова дія, швидкість седиментації) та геоморфологічні характеристики об'єктів аквакультури (Nordvarg and Hakanson 2002; Kalantzi and Karakassis 2006) сильно впливають на долю будь-якого типу відходів, що потрапляють у товщу води.

Стічні води з інтенсивних виробничих систем з великою кількістю кормів, як правило, мають більший негативний вплив, ніж стічні води з напівінтенсивних або екстенсивних систем з невеликою кількістю кормів або без них (Kautsky та ін., 2000; PérezOsuna, 2001).

Відходи аквакультури, включаючи нез'їдені корми, екскременти риб та залишки хімічних речовин, мають значний вплив на навколишнє середовище. Надлишок поживних речовин, таких як азот і фосфор, сприяє забрудненню води та евтрофікації, що призводить до виснаження кисню і шкідливого цвітіння водоростей. Використання хімікатів в аквакультурі може призвести до стійкості до антибіотиків та порушення екосистеми, а деградація середовища існування, наприклад, вирубка мангрових лісів, загрожує біорізноманіттю. Вирішення цих проблем вимагає сталих практик, таких як поліпшення управління відходами та екологічно чисті методи ведення сільського господарства, щоб мінімізувати негативний вплив аквакультури на навколишнє середовище.

## 5.1. Забруднення поживними речовинами

Відходи аквакультури, зокрема, нез'їдені корми та екскременти риб, вносять у навколишні води високий рівень азоту та фосфору. Таке збагачення поживними речовинами може призвести до евтрофікації, що характеризується надмірним цвітінням водоростей, яке виснажує рівень кисню і шкодить водним мешканцям.

Надходження неорганічних сполук (наприклад, аміаку, нітратів, нітритів і фосфатів) внаслідок розкладання органічних речовин, виділень тварин і внесення добрив у водойми також може мати потенційно небезпечний вплив на навколишнє середовище (Wu 1995; Dev 1998; Tovar та ін. 2000; Pérez-Osuna 2001; Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes 2003; Biao & Kaijin 2007; Pérez et al. 2008). Більшість небажаних екологічних наслідків, пов'язаних з надмірним надходженням поживних речовин зі скидами аквакультури, пов'язані з евтрофікацією і включають, наприклад, гіпернуріцію та виснаження розчиненого кисню, що спричиняють погіршення якості води (Tovar та ін. 2000a; Read & Fernandes 2003). Навантаження поживними речовинами також впливає на запас поживних речовин у водних системах, стимулюючи ріст первинних продуцентів (Read & Fernandes 2003; Biao & Kaijin 2007) і навіть змінюючи структуру та склад цих ключових угруповань.

Якщо збагачення поживними речовинами збігається з певними фізичними умовами та іншими маловивченими факторами, може спостерігатися зростання токсичних видів фітопланктону, що призводить до утворення шкідливого цвітіння водоростей (HAB) (Biao & Kaijin 2007). Наприклад, у 1993 і 1995 роках уздовж північного узбережжя Жовтого моря було задокументовано повідомлення про ВЦВ *Chattonella marina*, ймовірно, спричинене скиданням стічних вод з креветочних ферм (Biao & Kaijin 2007). Токсичне цвітіння фітопланктону може виробляти різні типи токсинів (наприклад, DSP - діарейне отруєння молюсків, PSP - паралітичне отруєння молюсків і ASD - амнезійна хвороба молюсків), які часто спричиняють отруєння молюсків і загибель бентичної фауни та дикої/вирощеної риби, тим самим загрожуючи економічній життєздатності аквакультури (Pearson & Black 2001; Read & Fernandes 2003; Gyllenhamman & Hakanson 2005). Хоча потенціал евтрофікації видається малоімовірним для морського садкового рибництва через ефект розбавлення морською водою (Wu 1995; Pearson & Black 2001), не можна виключати можливість локальної евтрофікації в зонах з поганим зливом (Wu 1995; Pearson & Black 2001). У зонах з обмеженим обміном, таких як прибережні лагуни та естуарії, надмірна доступність поживних речовин може вплинути на продуктивність екосистеми, а в деяких випадках негативно позначитися на самій аквакультурі (Dev 1998; Pérez-Osuna 2001b).

## 5.2. Хімічне забруднення

Використання антибіотиків та інших хімічних речовин в аквакультурі для профілактики захворювань може призвести до потрапляння їхніх залишків у навколишнє середовище. Ці речовини можуть порушити місцеві екосистеми та сприяти розвитку бактерій, стійких до антибіотиків. Дослідження показують, що забруднювачі від аквакультури швидко розсіюються в річках, але стічні води рибницьких господарств складають менше 1% від загального обсягу зважених речовин, біологічного споживання кисню та фосфору, що потрапляють у навколишнє середовище. Хімічні речовини, що використовуються в аквакультурі, можна розділити на такі категорії 1) кормові добавки (наприклад, вітаміни, пігменти, мінерали та гормони), 2) дезінфікуючі засоби (наприклад, хлорне вапно, малахітовий зелений) та пестициди (наприклад, молuscoциди та рибоциди), 3) вапняні матеріали, 4) метали (наприклад антифосфати) та 5) ветеринарні препарати, включаючи антибіотики, анестетики, паразитоциди та вакцини (Read & Fernandes 2003), що використовуються для боротьби із зовнішніми та внутрішніми паразитами або мікробними інфекціями (Costello et al. 2001).

Використання антибіотиків в аквакультурі має кілька негативних наслідків для навколишнього середовища. Широке використання антибіотиків в аквакультурі може призвести до розвитку антибіотикорезистентних бактерій, які можуть передавати свої гени стійкості іншим бактеріям, в тому числі тим, що викликають захворювання у людей та інших тварин (Okocha et. al., 2018). Антибіотики можуть мати токсичний вплив на спільноти мікроорганізмів у водному середовищі, включаючи спільноти водоростей, які мають вирішальне значення для здоров'я водних екосистем (Li et al., 2024). Крім того, антибіотики та їхні побічні продукти можуть зберігатися в природному середовищі через їхній складний біологічний розпад, накопичуючись у донних відкладах, водних поверхнях і ґрунтових водах, що призводить до довготривалого забруднення довкілля. Присутність антибіотиків у водному середовищі може спричинити серйозні зміни у складі та структурі бактеріальних спільнот, впливаючи на загальний стан здоров'я та біорізноманіття водних екосистем (Luthman et al., 2024). Крім того, використання антибіотиків в аквакультурі може призвести до наявності залишкових кількостей антибіотиків у рибі та інших продуктах аквакультури, що створює ризики для здоров'я людей, які споживають ці продукти. Нерозбірливе використання антибіотиків в аквакультурі також може призвести до порушення нормальної мікрофлори кишечника водних тварин, що негативно позначиться на їхньому здоров'ї та зростанні. Більше того, накопичення антибіотиків у навколишньому середовищі може призвести до розвитку антибіотикорезистентних патогенів, які можуть поширитися на інші екосистеми і становити загрозу як для водного, так і для наземного життя (Farias et al., 2024).

Також використовуються інші біологічні продукти, такі як розкладачі органічних

речовин (наприклад, бактерії та ферментні препарати) (Gräslund & Bengtsson 2001). Застосування цих хімічних речовин в основному залежить від системи культивування. Наприклад, якщо напівінтенсивні креветочні ферми потребують мінімального використання хімікатів, переважно добрив і вапна (Boyd & Massaut 1999; Choo 2001; Gräslund & Bengtsson 2001), то в міру інтенсифікації виробництва креветок управління стає більш проблематичним, а кількість і різноманітність хімічних сполук значно зростає (Gräslund & Bengtsson 2001).

Інтенсивне вирощування в ставках також вимагає більшої різноманітності хімічних речовин у порівнянні з системами утримання в клітках, де здебільшого використовуються дезінфікуючі засоби, антифоліанти та ветеринарні препарати (Kelly & Elberizon 2001; Read & Fernandes 2003). Основні екологічні ризики, пов'язані з використанням хімічних сполук, стосуються: i) погіршення якості води, ii) втручання в біогеохімічні процеси, iii) прямої токсичності для дикої фауни і флори, iv) розвитку резистентності патогенних організмів і v) зниження профілактичної ефективності терапевтичних засобів (Костелло та ін. 2001). Неправильне використання хімічних сполук може також вплинути на безпеку продукції аквакультури, становлячи загрозу для здоров'я людини (Choo 2001, Islam et al. 2004).

## Підсумок

Аквакультура відіграє життєво важливу роль у глобальній продовольчій безпеці, але її стрімке зростання викликає значні екологічні проблеми, особливо в епоху зміни клімату. Галузь є основним джерелом викидів парникових газів, руйнування середовища існування та виснаження ресурсів. Вуглекислий газ, метан і закис азоту виділяються в результаті енергоємних операцій, виробництва кормів та утилізації відходів. Багато об'єктів аквакультури використовують викопне паливо для виробництва електроенергії, що збільшує викиди вуглецю, а анаеробні умови в рибних ставках сприяють виділенню метану.

Крім того, викиди закису азоту є наслідком багатого на азот середовища, створеного надлишком кормів і добрив. Швидке розширення аквакультури також призвело до масштабних змін у землекористуванні, особливо в прибережних і водно-болотних екосистемах. Мангрові зарості та інші життєво важливі середовища існування були вирубані, щоб звільнити місце для креветочних ферм і рибних ставків, що призвело до втрати біорізноманіття, берегової ерозії та зменшення поглинання вуглецю. Виробництво кормів є одним з найбільших факторів впливу аквакультури на навколишнє середовище, на нього припадає більшість викидів. Традиційні корми на основі рибного борошна створюють тиск на морські ресурси, тоді як рослинні альтернативи, такі як соя, сприяють вирубці лісів, деградації земель та надмірному використанню води. Протеїни на основі комах та інші нові джерела кормів пропонують потенційні рішення, але їх широкомасштабне впровадження залишається обмеженим через економічні та логістичні проблеми. Іншою важливою проблемою є утворення відходів, оскільки нез'їдені корми, риб'ячі екскременти та залишки хімічних речовин сприяють забрудненню води, евтрофікації та цвітінню шкідливих водоростей, що призводить до виснаження кисню та дисбалансу екосистем. Використання антибіотиків в аквакультурі викликає занепокоєння щодо антибіотикорезистентності, яка може впливати як на водне середовище, так і на здоров'я людини. Вирішення цих проблем вимагає переходу до сталих практик, включаючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії, оптимізацію ефективності кормів, прийняття стратегій відповідального землекористування та впровадження ефективних рішень щодо управління відходами. Оскільки світовий попит на морепродукти продовжує зростати, збалансування зростання аквакультури з екологічною відповідальністю має вирішальне значення для забезпечення довгострокової стійкості галузі та мінімізації її впливу на довкілля.

## Посилання

- 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*, vol. 29, no. 3, pp. 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*, Vol. 81, No. 2, pp. 169-

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*, vol. 34, no. 4, pp. 325–333.

Holmer, M., Hansen, P.K., Karakassis, I., Borg, J.A., Schembri, P.J. (2008). Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In: Holmer, M., Black, K., Duarte, C.M., Marbà, N., Karakassis, I. (eds) *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, Dordrecht.

Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007): 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 and Karakassis, 2006: 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 et al., 2000: 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., J. H. 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*, vol. 405, no. 6790, pp. 1017–1024.

Nash, C. E. (2005). *The history of aquaculture*. Blackwell Publishing.

Nordvarg and Håkanson, 2002: Nordvarg, L., & Håkanson, L. (2002). Predicting the environmental impacts of fish farms using flow models. *Aquaculture International*, 10(5), 359-379.

O’Flynn et al., 2021: 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. & Adediji, 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 camaronicultura en ' la zona costera, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 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 et al. (2018): 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*, vol 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., Yuliati, L., Komariyah, S. & Musaiyaroh, 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*, vol 8, no 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*. Vol 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*, vol. 2, no. 11, pp. 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*, vol. 89, no. 2, pp. 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. pp. 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.

## Словниковий запас

**Анаеробні умови:** Це середовище з низьким вмістом або відсутністю кисню, наприклад, дно водойм або водно-болотні угіддя. У таких умовах органічні матеріали розкладаються по-іншому, часто виділяючи гази, такі як метан.

**Біорізноманіття:** Це поняття стосується різноманітності життя на певній території, включаючи рослини, тварин і мікроорганізми. Біорізноманіття має важливе значення для здорових екосистем, оскільки кожен вид відіграє певну роль у підтримці балансу.

**Вуглецевий слід:** Загальна кількість парникових газів (таких як вуглекислий газ і метан), що утворюються в результаті діяльності людини, наприклад, при керуванні автомобілем, виробництві продуктів харчування або роботі промислових підприємств, і сприяють зміні клімату.

**Евтрофікація:** Процес, коли у водойми, такі як озера чи річки, надходить забагато поживних речовин (наприклад, азоту та фосфору). Це спричиняє надмірний ріст водоростей, які можуть блокувати сонячне світло і зменшувати кількість кисню, завдаючи шкоди водним мешканцям.

**Коефіцієнт перетворення корму (FCR):** Міра ефективності тварини в перетворенні маси корму в масу тіла, що використовується як індикатор в аквакультурі.

**Парникові гази (ПГ):** Гази, такі як вуглекислий газ, метан і закис азоту, які затримують тепло в атмосфері і сприяють глобальному потеплінню.