

Анотація
ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ ДЛЯ
АКВАКУЛЬТУРИ

Бойко Ю. А., бакалавр кафедри водних біоресурсів та аквакультури

У сучасних умовах поглиблення глобальної екологічної кризи зростає необхідність у забезпеченні збереження, раціонального використання та відновлення природних ресурсів, серед яких особливої уваги потребують прісноводні екосистеми. Природні водойми, виступаючи важливим елементом гідросфери, не лише виконують функції акумуляторів і регуляторів гідрологічного балансу, але й є основою гідроекологічної стабільності та джерелом біопродуктивності, необхідної для функціонування галузі аквакультури. Водне середовище забезпечує життєвий простір для гідробіонтів, формує структуру трофічних ланцюгів і визначає санітарно-гігієнічні умови виробництва продукції рибництва.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є здійснення комплексної оцінки екологічного стану природних водойм різного типу й ступеня антропогенного навантаження, виявлення основних екологічних чинників, що впливають на ефективність функціонування аквакультурних систем, а також визначення перспективних шляхів покращення екологічної якості водного середовища з урахуванням принципів сталого розвитку.

У кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуто питання впливу екологічних факторів на розвиток аквакультури проблеми та перспективи поліпшення екологічного стану природних водойм.

Особлива увага приділяється впровадженню екосистемного підходу до управління водними ресурсами, що передбачає гармонізацію інтересів охорони довкілля, рибного господарства, місцевих громад і природокористувачів.

Кваліфікаційна робота бакалавра представлена на 63 сторінках і включає в себе 21 таблицю, 3 рисунки, 72 літературних джерела посилань.

Ключові слова: екологічний стан, природні водойми, аквакультура, моніторинг води, біологічні індикатори, забруднення води, екологічні технології, сприятливі умови, кормові ресурси.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ.....	6
1.1 Поняття екологічного стану природних водойм.....	6
1.2 Основні критерії оцінки водних екосистем.....	9
1.3 Методи моніторингу та оцінки стану водойм.....	13
2 ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА РОЗВИТОК АКВАКУЛЬТУРИ	18
2.1 Основні джерела забруднення природних водойм та їх вплив на аквакультуру.....	18
2.2 Хімічний склад води та його вплив на аквакультуру.....	35
2.3 Біологічні фактори, що визначають екологічний стан водойм.....	39
3 ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОЛІПШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРИ.....	43
3.1 Загрози забруднення водойм і їх наслідки для аквакультури.....	43
3.2 Оцінка стійкості водних екосистем до антропогенного впливу.....	48
3.3 Шляхи поліпшення екологічного стану водойм для сталого розвитку аквакультури.....	52
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	59

ВСТУП

У сучасних умовах поглиблення глобальної екологічної кризи зростає необхідність у забезпеченні збереження, раціонального використання та відновлення природних ресурсів, серед яких особливої уваги потребують прісноводні екосистеми. Природні водойми, виступаючи важливим елементом гідросфери, не лише виконують функції акумуляторів і регуляторів гідрологічного балансу, але й є основою гідроекологічної стабільності та джерелом біопродуктивності, необхідної для функціонування галузі аквакультури. Водне середовище забезпечує життєвий простір для гідробіонтів, формує структуру трофічних ланцюгів і визначає санітарно-гігієнічні умови виробництва продукції рибництва. З огляду на це, забезпечення високої якості води, біотичного різноманіття та екологічної рівноваги у водних екосистемах є ключовими передумовами сталого функціонування рибного господарства, що зумовлює актуальність дослідження факторів, які впливають на динаміку водного середовища та аквакультурні процеси.

Негативні зміни, які фіксуються в екосистемах природних водойм, є результатом зростання інтенсивності антропогенного тиску, що проявляється у вигляді забруднення різного генезу (сільськогосподарського, промислового, комунального, атмосферного), трансформації природного гідрологічного режиму, фрагментації гідромережі, евтрофікації та біотичних дисбалансів. Ці процеси призводять до деградації гідробіоценозів, зниження рибопродуктивності, втрати біорізноманіття, зростання частки стійких або інвазивних видів, а також до погіршення санітарно-біологічних характеристик рибної продукції. Важливими наслідками таких змін є зниження екосистемної резилієнтності водойм, зменшення здатності до самоочищення та відновлення, що в свою чергу обмежує перспективи розвитку аквакультурних систем, які базуються на природному водному потенціалі.

Вказані обставини зумовлюють необхідність запровадження системного моніторингу екологічного стану водних об'єктів, який передбачає інтеграцію

фізико-хімічних, біологічних, гідроморфологічних та екологічно-економічних індикаторів. Особливого значення набуває впровадження інтегрованих систем екологічної оцінки, що ґрунтуються на багатокомпонентному аналізі стану водного середовища, зокрема біоіндикаційних методів, індексів сапробності, тропічного статусу, біорізноманіття (індекс Шеннона), а також сучасних цифрових підходів, включаючи дистанційне зондування, ГІС-технології та моделювання сценаріїв екосистемної динаміки. Додатково актуальним є врахування положень Водної Рамкової Директиви ЄС (2000/60/ЄС), яка визначає концептуальну основу для інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є здійснення комплексної оцінки екологічного стану природних водойм різного типу й ступеня антропогенного навантаження, виявлення основних екологічних чинників, що впливають на ефективність функціонування аквакультурних систем, а також визначення перспективних шляхів покращення екологічної якості водного середовища з урахуванням принципів сталого розвитку. Особлива увага приділяється впровадженню екосистемного підходу до управління водними ресурсами, що передбачає гармонізацію інтересів охорони довкілля, рибного господарства, місцевих громад і природокористувачів.

Об'єктом дослідження виступають водні екосистеми — річкові, озерні, лиманні та водосховищні комплекси, які зазнають впливу різних джерел антропогенного навантаження. Предметом дослідження є зв'язок між фізико-хімічними та біотичними параметрами водного середовища і рівнем біопродуктивності, видовим складом іхтіофауни, біобезпекою продукції та загальною ефективністю функціонування аквакультурних технологій.

У процесі дослідження було застосовано широкий спектр методів, серед яких: гідрохімічний аналіз (визначення рН, розчиненого кисню, біогенів, важких металів, ХСК та БСК), біоіндикаційні підходи (визначення біоіндикаторних видів, індекси сапробності, тропічні індекси), статистичні методи обробки даних, аналіз нормативно-правових актів України та міжнародних стандартів (зокрема директив ЄС, ISO 5667, рекомендацій OECD).

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ

Оцінка екологічного стану природних водойм є важливою складовою сучасної екології, гідробіології та водного менеджменту. Вона базується на інтеграції знань про біологічні, хімічні, фізичні та гідрологічні процеси, що відбуваються у водних екосистемах. Основною метою такої оцінки є визначення ступеня наближеності екосистеми до природного стану та виявлення антропогенних змін, що впливають на її функціонування[1].

Екологічний стан водойм розглядається як сукупність характеристик, що відображають цілісність, стабільність і продуктивність екосистеми. Теоретичною основою такого підходу є концепції екосистемної рівноваги, біоіндикації, трофічної структури та біотичних індексів. Важливе значення має визначення біоіндикаторів — видів або груп організмів, чутливих до змін у середовищі, зокрема до забруднення або евтрофікації. Найчастіше для цього використовуються гідробіонти: фітопланктон, зоопланктон, бентос, риби, макрофіти[2].

1.1 Поняття екологічного стану природних водойм

Екологічний стан природних водойм є інтегральною характеристикою, яка відображає здатність водної екосистеми зберігати свою структурну й функціональну цілісність, а також біологічне різноманіття в умовах дії природних і антропогенних факторів. Цей стан визначається на основі сукупності фізико-хімічних, біологічних і гідроморфологічних індикаторів, що дозволяють здійснити повноцінну діагностику рівня порушення природних умов і наявного потенціалу водойми до самовідновлення.

Фізико-хімічні характеристики води є базовими індикаторами стану водного середовища. Найбільш інформативними серед них є концентрація

розчиненого кисню (понад 5 мг/дм³ — задовільний рівень), значення рН (оптимально 6,5–8,5), вміст біогенних елементів (нітрати, фосфати), а також рівень забруднення важкими металами, такими як свинець, кадмій та ртуть. У таблиці 1.1 нижче наведено типові нормативи та граничні концентрації деяких хімічних показників згідно з державними стандартами та міжнародними рекомендаціями[3].

Таблиця 1.1 - Типові нормативи та граничні концентрації деяких хімічних показників [1-4]

Показник	Одиниця виміру	Норма (ГДК)
Розчинений кисень	мг/дм ³	≥ 5,0
рН	-	6,5–8,5
Нітрати	мг/дм ³	≤ 40
Фосфати	мг/дм ³	≤ 0,3
Свинець (Pb)	мг/дм ³	≤ 0,01
Кадмій (Cd)	мг/дм ³	≤ 0,001

Крім гідрохімічного стану, важливе значення мають біологічні показники, які дозволяють оцінити стабільність і продуктивність водної екосистеми. До них відносять різноманіття й чисельність фітопланктону, зоопланктону, бентосу, риб та водної рослинності. Зокрема, аналіз індексів видового різноманіття (наприклад, індекс Шеннона), домінуючих таксонів та присутність індикаторних видів дозволяє виявити процеси евтрофікації, органічного забруднення або деградації біоценозу. У таблиці 1.2 подано приклади організмів-індикаторів[4].

Таблиця 1.2 - Приклади біоіндикаторів стану водойм

Група організмів	Індикаційне значення	Приклад
Фітопланктон	Евтрофікація	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>

Група організмів	Індикаційне значення	Приклад
Зоопланктон	Забруднення органікою	<i>Brachionus calyciflorus</i>
Бентос	Кисневе живлення, сапробність	<i>Tubifex tubifex</i>
Риби	Загальна трофічність, інтродукція	<i>Pseudorasbora parva</i> (інвазивний вид)

Гідроморфологічні характеристики також відіграють важливу роль в оцінці екологічного стану, оскільки відображають фізичну структуру водойми. До них належать глибина та ширина водойми, швидкість течії, будова берегової лінії, наявність заплав і ступінь зарегульованості стоку. Ці показники визначають гідрологічний режим, стійкість до замулення, здатність до самоочищення та функціонування середовища існування водних організмів.

Антропогенне навантаження залишається одним із ключових факторів деградації водних екосистем. До основних форм такого впливу належать скиди промислових та побутових стічних вод, будівництво гідротехнічних споруд (дамб, водосховищ), інтенсивне сільськогосподарське використання прибережних територій, рекреаційне навантаження, а також інтродукція чужорідних видів, які здатні витіснити місцеву іхтіофауну або змінювати трофічні ланцюги[5].

З метою систематизації даних і впровадження єдиних підходів до оцінювання, екологічний стан водойм класифікується за п'ятибальною шкалою відповідно до Водної рамкової директиви ЄС (2000/60/ЕС): дуже добрий, добрий, задовільний, поганий і дуже поганий. Дуже добрий стан передбачає мінімальний антропогенний вплив і відповідність біоти природному (референсному) типу, тоді як дуже поганий стан свідчить про істотну деградацію структури біоценозів і необхідність термінових відновлювальних заходів[6].

Таблиця 1.3 - Класифікація екологічного стану водойм

Категорія	Характеристика	Ознаки
Дуже добрий	Мінімальний антропогенний вплив, біота відповідає природному типу	Висока прозорість, низька евтрофікація
Добрий	Незначні відхилення, стабільна екосистема	Часткова зміна фітопланктону
Задовільний	Помірна деградація, необхідні контрольні заходи	Зниження чисельності чутливих видів
Поганий	Високий рівень забруднення, деградація структури біоценозів	Домінування толерантних видів
Дуже поганий	Суттєва екологічна катастрофа	Різке падіння біорізноманіття, гіпоксія

Таким чином, екологічна оцінка стану природних водойм є надзвичайно важливим інструментом для збереження та відновлення водних екосистем, а також для раціонального управління водними ресурсами. Вона забезпечує основу для прийняття управлінських рішень, виконання національних екологічних програм і міжнародних зобов'язань України, зокрема в рамках імплементації Водної рамкової директиви ЄС. Своєчасна та комплексна оцінка екологічного стану сприяє зменшенню ризиків деградації середовища, запобіганню втратам біорізноманіття, а також сталому розвитку галузей, пов'язаних із водокористуванням[7].

1.2 Основні критерії оцінки водних екосистем

Оцінка стану водних екосистем є базовим елементом сучасної системи екологічного моніторингу та невід'ємною складовою природоохоронної політики. Вона спрямована на визначення загального екологічного статусу

водойм, їх стабільності, здатності до саморегуляції та відновлення. Методологічною основою такого оцінювання виступає комплексний аналіз фізико-хімічних, біологічних, гідрологічних, морфометричних та антропогенних характеристик водного середовища[8].

Фізико-хімічні параметри забезпечують базову інформацію про умови існування гідробіонтів, біотичні взаємодії та процеси трансформації речовин у водоймах. Основними індикаторами є температура води, концентрація розчиненого кисню, значення рН, прозорість, електропровідність, а також вміст біогенних і токсичних речовин. Порушення цих показників, наприклад, зниження концентрації кисню або підвищення вмісту біогенів, може призводити до евтрофікації, гіпоксії, масової загибелі риби та порушення трофічних ланцюгів[9].

Таблиця 1.4 - Орієнтовні нормативні значення фізико-хімічних показників
(за [1], [2])

Показник	Оптимальний діапазон для здорової екосистеми
Температура, °С	10–25
Розчинений кисень, мг/дм ³	> 6
рН	6.5–8.5
Прозорість, м	> 1
Електропровідність, мкСм/см	150–500
Нітрати (NO ₃ ⁻), мг/дм ³	< 10
Фосфати (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	< 0.1
Амоній (NH ₄ ⁺), мг/дм ³	< 0.5
Важкі метали (Pb, Cd, Hg), мг/дм ³	< 0.01

Біоіндикаційні методи дозволяють оцінити екологічний стан водойм на основі аналізу структури та функціонування біоценозів. Важливими є показники

чисельності, біомаси, домінування видів фітопланктону, зоопланктону, макрофітів, бентосу і іхтіофауни.

Особливе значення має сапробіологічний аналіз, що класифікує водойми за ступенем органічного забруднення (оліго-, β - та α -мезо-, полі- та евсапробні зони). Біоіндекси, такі як індекс Шеннона (H') та індекс Маргалефа (d), дозволяють кількісно оцінити рівень біорізноманіття[10].

Таблиця 1.5 - Значення біоіндексів для оцінки екологічного стану водойм
(за [3], [4])

Індекс	Діапазон значень	Інтерпретація
Шеннона (H')	> 3.5	Високе біорізноманіття, стабільна система
	2–3.5	Середній рівень стабільності
	< 2	Стресові умови, деградована екосистема
Маргалефа (d)	> 5	Добре розвинена екосистема
	2–5	Помірно стабільна
	< 2	Спрощена структура, можливі порушення

Гідрологічні та морфометричні характеристики охоплюють особливості будови водойми, її режимів та гідродинаміки: глибину, площу, об'єм, швидкість течії, сезонну змінність рівнів. Вони визначають рівень самоочищення водойми, умови для нересту, розвиток фіто- і зообіонтів.

Наприклад, повільна течія та мала глибина сприяють осіданню органічних речовин і створюють умови для гіпоксії, тоді як швидка течія сприяє аерації води та зниженню концентрацій забруднювальних речовин.

До антропогенних чинників належать рекреаційне навантаження; забруднення стічними водами (побутовими, промисловими, сільськогосподарськими); гідротехнічні споруди; інтродукція чужорідних видів[11].

Таблиця 1.6 - Основні джерела антропогенного навантаження на водойми
(адаптовано з [5])

Джерело забруднення	Основні наслідки
Побутові стоки	Органічне забруднення, евтрофікація
Агрохімікати (нітрати, пестициди)	Токсичні ефекти, зниження біорізноманіття
Промислові викиди	Важкі метали, мутагенні речовини
Зарегулювання річок	Порушення гідрологічного режиму, фрагментація середовищ
Інвазійні види	Витіснення автохтонних видів, біоценотичні зрушення

Одним із комплексних показників є трофічний статус, що класифікує водойми за рівнем продуктивності: оліготрофні водойми мають низьку первинну продукцію та високу прозорість води; мезотрофні характеризуються помірним розвитком біоти та стабільністю; евтрофні демонструють масовий розвиток фітопланктону, «цвітіння» води та зменшення її прозорості; гіперевтрофні водойми зазнають кисневого дефіциту на дні, що призводить до масової загибелі біоти.

Комплексна оцінка водних екосистем із врахуванням багаторівневих показників дозволяє виявити екологічні загрози, визначити пріоритетні заходи для збереження та відновлення водного середовища, а також сформулювати науково обґрунтовану екологічну політику на регіональному та національному рівнях[12].

1.3 Методи моніторингу та оцінки стану водойм

Моніторинг та оцінка стану водойм — це систематичне спостереження за водним середовищем, яке дозволяє виявити зміни у його екологічному стані, встановити причини таких змін і своєчасно вжити заходів щодо збереження чи відновлення водної екосистеми.

Ефективна оцінка стану водойм ґрунтується на застосуванні різних методів, які охоплюють фізико-хімічні, біологічні, гідрологічні та інструментальні показники[13].

Одним із ключових напрямів є гідрохімічний моніторинг, який передбачає визначення основних хімічних параметрів води. До них належать температура, водневий показник (рН), вміст розчиненого кисню, концентрації нітратів, нітритів, фосфатів, амонію, важких металів, а також рівні хімічного (ХСК) і біологічного (БСК) споживання кисню. Ці показники дають змогу оцінити рівень органічного та неорганічного забруднення, потенціал до евтрофікації й загальну якість води[14].

Не менш важливим є біологічний моніторинг, який базується на дослідженні складу та стану гідробіонтів. Біологічні угруповання, зокрема фітопланктон, зоопланктон, зообентос, макрофіти та риби, є чутливими до змін у водному середовищі, тому їхнє вивчення дозволяє виявити навіть незначні відхилення у стані екосистеми. Застосовуються біоіндикаторні види, а також розраховуються індекси різноманіття, сапробності та домінування, які вказують на ступінь забруднення і стабільність екосистеми.

До гідрофізичних методів належать вимірювання прозорості води (дискон Секкі), електропровідності, температурного профілю, швидкості течії, коливання рівнів води. Ці параметри є основою для розуміння умов існування водних організмів і здатності водойми до самоочищення[15].

Важливою складовою оцінки є застосування інтегрованих біоіндексів. Наприклад, індекс сапробності (за Pantle-Buck або Sládeček), який відображає рівень органічного забруднення, або індекс Шеннона — для визначення біорізноманіття. Також використовуються міжнародні системи оцінки якості

води за макрозообентосом (BMWP, ASPT), що дозволяють проводити стандартизовану порівняльну оцінку різних водойм[16].

У сучасних умовах дедалі ширше застосовуються інструментальні та дистанційні методи моніторингу. До них належать автоматизовані сенсори, що постійно фіксують параметри води (рН, кисень, температура), супутникове зондування Землі для спостереження за масштабними змінами, а також використання геоінформаційних систем (ГІС) для візуалізації та аналізу екологічного стану водойм.

Окрему роль відіграє громадський екологічний моніторинг, який передбачає залучення місцевих жителів, екологічних організацій і навчальних закладів до спостереження за станом водойм. Це дозволяє оперативно виявляти локальні проблеми, сприяє підвищенню екологічної свідомості та посиленню контролю за станом довкілля[17].

Отже, методи моніторингу та оцінки стану водойм охоплюють цілу систему підходів, які в сукупності дозволяють всебічно аналізувати стан водного середовища, виявляти негативні тенденції та забезпечувати ефективне управління водними ресурсами. Регулярне застосування цих методів є запорукою збереження водних екосистем у природному або наближеному до нього стані.

Основні напрямки моніторингу.

Комплексний моніторинг охоплює кілька основних напрямів представлених в табл. 1.7

Таблиця 1.7 - Основні напрямки комплексного моніторингу

Напрямок моніторингу	Основні показники	Методичні підходи
Гідрохімічний	рН, температура, O ₂ , нітрати, фосфати, амоній, важкі метали, ХСК, БСК	Лабораторний аналіз, польові вимірювання

Напрямок моніторингу	Основні показники	Методичні підходи
Біологічний	Склад фітопланктону, зоопланктону, зообентосу, макрофітів, риб	Біоіндикація, обчислення біоіндексів
Гідрофізичний	Прозорість, електропровідність, швидкість течії, рівень води	Секкі-диск, зонди, термопрофілювання
Інструментальний / ГІС	Безперервний моніторинг за допомогою сенсорів, супутникові дані	Автоматизовані станції, дистанційне зондування
Громадський екологічний	Виявлення локальних змін, збір зразків	Участь населення, освітні програми

Гідрохімічний моніторинг. Гідрохімічні дослідження є базовими у вивченні стану водойм, оскільки дозволяють оперативно і точно визначати ступінь забруднення. Типові параметри, що аналізуються в межах таких досліджень, наведені у таблиці 1.8[18].

Таблиця 1.8 Ключові гідрохімічні показники якості води (за: ДСТУ ISO 5667-6:2005; Жеребцова, 2019)

Показник	Одиниці вимірювання	Граничнодопустиме значення (ГДК)*	Екологічне значення
Температура	°C	—	Впливає на розчинність газів та метаболізм

Показник	Одиниці вимірювання	Граничнодопустиме значення (ГДК)*	Екологічне значення
Водневий показник (рН)	–	6,5–8,5	Визначає кислотно-лужну рівновагу
Розчинений кисень (O ₂)	мг/дм ³	>4,0	Необхідний для життя водних організмів
Нітрати (NO ₃ ⁻)	мг/дм ³	≤40	Джерело евтрофікації
Фосфати (PO ₄ ³⁻)	мг/дм ³	≤0,2	Індукують розвиток водоростей
Амоній (NH ₄ ⁺)	мг/дм ³	≤0,5	Показник органічного забруднення
Важкі метали (Pb, Cd, Hg тощо)	мг/дм ³	Залежно від елемента	Токсичний вплив, біоаккумуляція
ХСК, БСК	мг O ₂ /дм ³	≤30 / ≤3	Рівень хімічного/біологічного забруднення

*Згідно з Водною рамковою директивою ЄС 2000/60/ЄС

Біологічний моніторинг. Біологічні методи базуються на оцінці структурних і функціональних характеристик гідробіонтів. Біоіндикаторні види реагують на зміни середовища, дозволяючи комплексно оцінити стан водойм (табл. 1.9).

Таблиця 1.9 Основні біоіндекси та їхнє значення (за: Sládeček, 1973; Захарова, 2021)

Біоіндекс	Методика розрахунку	Інтерпретація результатів
Індекс сапробності	Pantle-Buck / Sládeček	0–1: чиста вода, 3–4: сильне забруднення
Індекс Шеннона (H')	Відношення кількості видів і їх часток	>3: високе різноманіття, <1: деградація
BMWP, ASPT	Бальна оцінка таксонів макрозообентосу	>100: добра якість, <50: забруднена вода

Інструментальні та дистанційні методи. Інструментальні методи передбачають використання сучасного обладнання для оперативного збору даних. Вони забезпечують безперервний моніторинг параметрів в режимі реального часу. Геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють інтегрувати дані з різних джерел для створення просторових моделей забруднення, визначення джерел антропогенного впливу та прогнозування змін (Kallio et al., 2022)[19].

Громадський екологічний моніторинг. Залучення громадськості до моніторингу — ефективний інструмент для підвищення екологічної свідомості населення та оперативного виявлення локальних проблем. Програми типу «Citizen Science» показали ефективність у низці країн Європи та США (Conrad & Hilchey, 2011).

Моніторинг і оцінка стану водойм — це багатокомпонентна система, яка включає фізико-хімічні, біологічні, гідрофізичні, інструментальні та соціальні аспекти. Тільки інтеграція даних з різних джерел дозволяє сформувати об'єктивну картину екологічного стану водних об'єктів і приймати обґрунтовані рішення щодо управління водними ресурсами[20].

2 ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА РОЗВИТОК АКВАКУЛЬТУРИ

2.1 Основні джерела забруднення природних водойм та їх вплив на аквакультуру

Забруднення природних водойм є одним із найсерйозніших викликів для збереження водних екосистем та ефективного функціонування аквакультурного виробництва (рис. 2.1, табл. 2.1). Під впливом різноманітних джерел забруднення погіршується якість води, змінюється її хімічний і біологічний склад, знижується рівень розчиненого кисню, порушуються трофічні ланцюги та зменшується біорізноманіття. Усі ці фактори безпосередньо впливають на здоров'я, ріст, відтворення й товарну цінність об'єктів аквакультури[21].

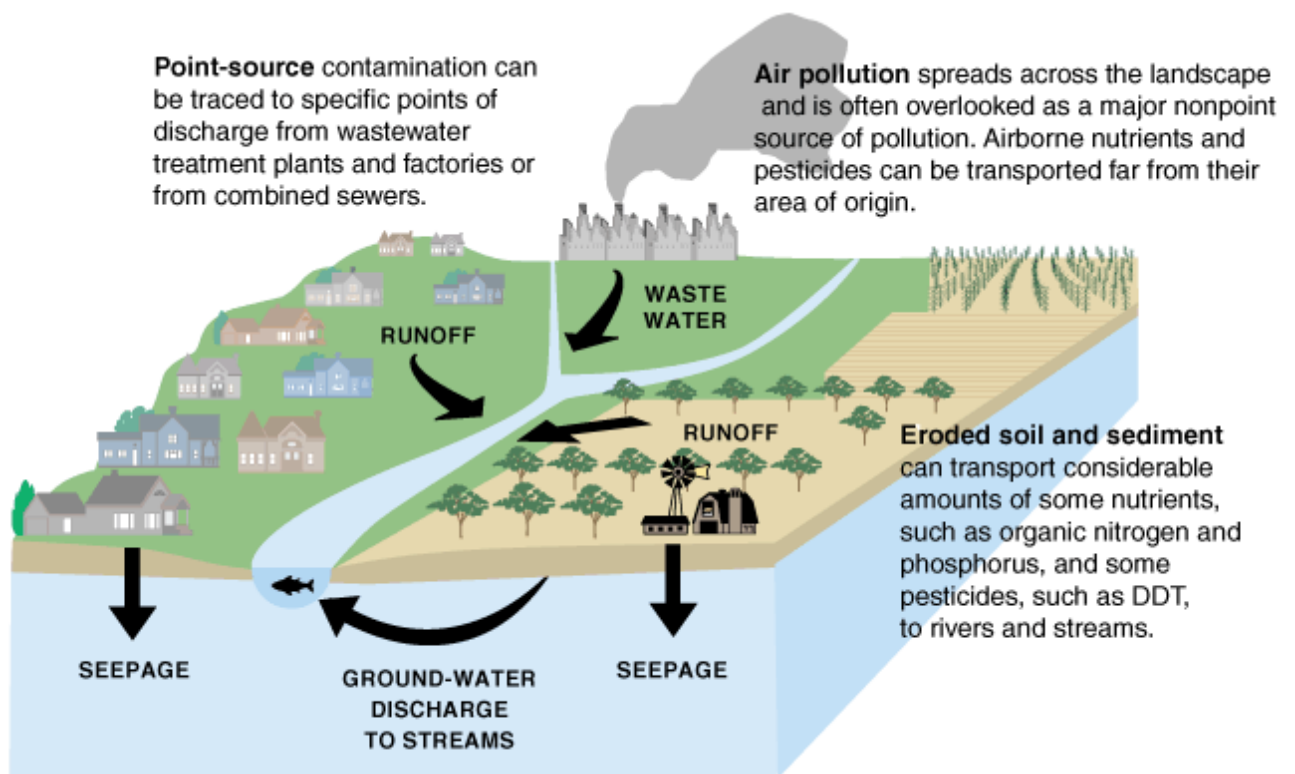


Рис. 2.1 - Основні джерела забруднення природних водойм

Таблиця 2.1 - Основні джерела забруднення природних водойм та їх вплив на аквакультуру\

Джерело забруднення	Типи забруднювачів	Вплив на водне середовище	Наслідки для аквакультури
Сільськогосподарський стік	Нітрати, фосфати, пестициди, гербіциди, органіка	Евтрофікація, зниження прозорості, гіпоксія	Загибель риби, погіршення смакових якостей, зростання патогенів, токсичність води
Промислові скиди	Важкі метали (Hg, Pb, Cd), феноли, нафтопродукти, кислоти	Токсичність, біоаккумуляція, зміна рН	Затримка росту, накопичення токсинів у м'язах, смертність личинок і мальків
Комунальні (побутові) стічні води	Органічні речовини, БСК, мікроорганізми (у т. ч. патогени), фармацевтичні речовини	Забруднення органікою, збільшення біологічного навантаження	Масова загибель молоді риби, хвороби, деградація нерестовищ
Атмосферне випадіння (осідання)	Сірчана та азотна кислоти, пил, мікропластик, важкі метали	Кислотні дощі, зміна рН, забруднення донних відкладів	Зменшення виживаності, порушення процесів дихання й розмноження
Аквакультурні господарства	Надлишковий корм, екскременти, залишки медикаментів, антипаразитарні засоби	Локальне органічне перенавантаження, розвиток анаеробних умов	Самозабруднення середовища, спалахи інфекцій, резистентність до антибіотиків

Джерело забруднення	Типи забруднювачів	Вплив на водне середовище	Наслідки для аквакультури
Будівництво, гідротехнічні споруди	Завислі речовини, цемент, мастила, шум	Зниження прозорості, порушення донних біоценозів, зміна гідродинаміки	Травматизація ікри та личинок, погіршення умов нересту

Сільськогосподарський стік є одним із найбільш поширених і значущих джерел дифузного забруднення поверхневих вод, що справляє комплексний негативний вплив на іхтіофауну природних водойм. Основними компонентами такого стоку є надлишки мінеральних добрив (переважно нітрати та фосфати), пестициди, гербіциди, органічні речовини та завислі частки ґрунту, які потрапляють у водойми внаслідок дощових або талі вод з орних угідь, пасовищ та оброблених сільськогосподарських територій (Жеребцова, 2019; Kallio et al., 2022)[22].

Підвищені концентрації нітратів і фосфатів стимулюють розвиток фітопланктону та водоростей, що призводить до процесу евтрофікації. Це, своєю чергою, спричиняє зменшення прозорості води, денне коливання концентрації розчиненого кисню та його дефіцит у нічний час або на глибоких шарах водойми. У таких умовах знижується життєздатність киснезалежних видів риби, особливо їхніх ранніх стадій розвитку (ікри, личинок, мальків), які є найбільш чутливими до гіпоксії (Лось, 2018). Масові цвітіння води також спричиняють загибель водної рослинності, що є місцем нагулу, укриття та нересту багатьох видів риби[23].

Крім того, агрохімікати, зокрема пестициди та гербіциди, мають токсичний вплив на водні організми. Вони можуть пригнічувати репродуктивні функції, викликати порушення ендокринної регуляції, знижувати імунну реактивність риби і сприяти розвитку захворювань (Захарова, 2021). Наявність у воді залишків

пестицидів, навіть у низьких концентраціях, призводить до сублетальних ефектів: зміни поведінки, зниження апетиту, дезорієнтації та затримки росту.

Органічне навантаження зі сільськогосподарського стоку (гній, залишки кормів, біомаса) посилює процеси біохімічного споживання кисню, що спричиняє анаеробні умови у придонних шарах. У результаті відбувається деградація донних біотопів, втрата кормової бази та загибель бентосних організмів, що слугують важливим трофічним ресурсом для багатьох іхтіофауністичних груп[24].

Також слід враховувати, що постійне надходження агрозабруднень призводить до трансформації іхтіофауни: зменшується чисельність та біомаса делікатних, киснезалежних і стенобіонтних видів, а домінування переходить до евритолерантних форм, здатних виживати в умовах нестачі кисню та високого трофічного навантаження (Sládeček, 1973). Таким чином, сільськогосподарський стік значно знижує біорізноманіття іхтіофауни, порушує екологічну рівновагу у водних екосистемах і обмежує потенціал використання природних водойм для рибного господарства та рекреаційних цілей[25].

Промислові скиди є одним із найбільш небезпечних джерел точкового забруднення природних водойм, що завдає значної шкоди іхтіофауні через наявність у складі стічних вод токсичних компонентів неорганічного та органічного походження. До основних забруднювачів, характерних для промислових стоків, належать важкі метали (ртуть, свинець, кадмій, мідь, цинк), нафтопродукти, феноли, хлорорганічні сполуки, поверхнево-активні речовини, кислоти та луги. Їхня концентрація часто перевищує гранично допустимі рівні для водних організмів, що створює критичні умови для існування риб та інших представників водної біоти (Sládeček, 1973; Лось, 2018)[26].

Важкі метали є кумулятивними токсикантами, здатними накопичуватися в тканинах риб і викликати хронічні отруєння. Їхній вплив проявляється у порушенні обміну речовин, функціонування ферментних систем, ураженні зябер, печінки, нирок та репродуктивної системи. Наявність у воді кадмію та

свинцю навіть у незначних кількостях здатна призвести до масової загибелі молоді риб, особливо в умовах тривалого впливу (Жеребцова, 2019). Крім того, такі речовини погіршують якість рибної продукції через накопичення в м'язовій тканині, що робить її непридатною для споживання людиною[27].

Органічні токсиканти, як-от феноли, хлорвмісні розчинники та нафтопродукти, є потужними мутагенами й канцерогенами. Вони здатні проникати через біологічні мембрани, викликаючи клітинні ушкодження, порушення ембріонального розвитку та зниження життєздатності потомства. Нафтопродукти особливо небезпечні у період нересту, коли вони утворюють на поверхні плівку, що порушує газообмін і призводить до загибелі ікри (Congrad & Hilchey, 2011)[28].

Окрім безпосереднього токсичного впливу, промислові скиди змінюють фізико-хімічні параметри водного середовища. Наприклад, кислотні або лужні стоки призводять до різкого зниження або підвищення рН, що є фатальним для більшості водних організмів. Коливання електропровідності, температури та концентрації розчинених солей негативно впливають на осмотичний баланс риб, спричиняючи стрес та імунодепресію (Kallio et al., 2022)[29].

У довгостроковій перспективі вплив промислового забруднення спричиняє трансформацію структури іхтіофауни. Із водойм зникають чутливі види (наприклад, лососеві, деякі коропові), тоді як зростає чисельність стійких до токсикантів організмів з коротким життєвим циклом. Порушується природна трофічна сітка, зменшується рибопродуктивність, що негативно впливає як на екологічну стабільність, так і на економічну доцільність використання водойм у рибному господарстві (Лось, 2018)[30].

Таким чином, промислові скиди становлять серйозну загрозу для водної біоти, викликаючи структурно-функціональні порушення у популяціях риб, деградацію біоценозів і погіршення загального екологічного стану водойм. Ефективне управління промисловими стоками, включаючи очищення,

моніторинг і нормативно-правовий контроль, є необхідною умовою для збереження іхтіофауни та сталого розвитку аквакультури[31].

Комунальні (побутові) стічні води становлять одну з найпоширеніших форм антропогенного навантаження на водні екосистеми, зокрема в урбанізованих регіонах. До складу цих вод входять різноманітні органічні речовини, залишки миючих засобів, біогенні елементи (азот і фосфор), патогенні мікроорганізми, фармацевтичні препарати, мікропластик і поверхнево-активні речовини. Наявність цих компонентів значною мірою впливає на гідробіоценози, а особливо — на іхтіофауну природних водойм (Жеребцова, 2019; Коржова, 2020).

Основним наслідком потрапляння побутових стічних вод у водойми є підвищення трофічного навантаження, яке активізує процес евтрофікації. Надлишок біогенних речовин сприяє масовому розвитку синьо-зелених водоростей, що знижують прозорість води, порушують світловий режим і ведуть до сезонних коливань кисню, зокрема нічної гіпоксії. Це особливо небезпечно для ікри та молоді риб, які мають обмежені адаптаційні можливості до нестачі кисню. Також у таких умовах погіршується якість нерестових і кормових угідь (Лось, 2018)[32].

Компоненти побутових стоків мають високу біологічну кисневу потребу (БСК), що посилює процеси деградації водного середовища. Інтенсивне розкладання органічної речовини мікроорганізмами супроводжується зниженням концентрації розчиненого кисню, що негативно впливає на фізіологічний стан риб, зменшує їхню стійкість до захворювань, порушує функціонування дихальної та осморегуляторної систем. Особливо чутливими до таких змін є представники родин Salmonidae та Cyprinidae, які потребують високоякісної, насиченої киснем води (Kowalczevska-Madura et al., 2018)[33].

Не менш загрозливим є вміст у побутових стоках синтетичних речовин — залишків медикаментів (антибіотики, гормони, анальгетики), які не повністю видаляються під час очищення. Потрапляючи у водойми, ці речовини діють як ендокринні дизруптори, змінюють репродуктивну поведінку риб, спричиняють

фемінізацію самців, зниження фертильності та імунодефіцит (Brodin et al., 2014). Дослідження також виявили вплив антидепресантів на поведінку риб, зокрема зниження здатності до уникнення хижаків, що знижує виживаність популяцій у природних умовах[34].

Крім того, побутові стоки часто містять високі концентрації мікропластику та поверхнево-активних речовин (ПАР), які акумулюються в організмах риб, викликають ушкодження травної системи, послаблення енергетичного обміну та посередковано впливають на ріст і виживання. У разі тривалого надходження таких забруднювачів відбувається спрощення структури іхтіофауни, витіснення стенобіонтних видів, зниження трофічної ефективності екосистеми та загальне зменшення біорізноманіття (Коржова, 2020).

Таким чином, побутові стічні води чинять багатокомпонентний негативний вплив на іхтіофауну через зміну кисневого режиму, евтрофікацію, токсичну дію органічних і синтетичних речовин, що у підсумку призводить до деградації водних екосистем. Мінімізація цього впливу потребує удосконалення систем очищення стічних вод, впровадження біотехнологій очищення та підвищення екологічної відповідальності населення[35].

Атмосферне випадіння (осідання) є важливою, хоча й менш очевидною формою забруднення природних водойм, яка справляє тривалий кумулятивний вплив на іхтіофауну. До атмосферних осідань належать тверді (пил, сажа, аерозолі) та рідкі (дощові, снігові, туманові) форми випадіння, що транспортують у водойми різноманітні забруднювачі з атмосфери. Основними джерелами таких речовин є викиди від енергетичних об'єктів, транспорту, промислових підприємств, сільськогосподарських полів та міських агломерацій (Расуна et al., 2007; Жеребцова, 2019).

Серед найбільш небезпечних компонентів атмосферних опадів — важкі метали (ртуть, свинець, кадмій), сірчані та азотні сполуки, пестициди, вуглеводні, а також вторинні забруднювачі, зокрема озон і кислоти. Їхній вплив на іхтіофауну здійснюється як прямо (токсичність), так і опосередковано —

через зміну фізико-хімічних властивостей водного середовища (рН, електропровідність, прозорість) (Kowalik et al., 2021).

Один із найпоширеніших ефектів атмосферного випадіння — кислотні дощі, які спричиняють зниження рН води. За умов підкислення водойм нижче значення 5,5 спостерігається масова загибель ікри та молоді багатьох видів риб, зокрема форелі, йоржа та окуня. Кисле середовище також збільшує розчинність алюмінію, який, потрапляючи у зябра, порушує газообмін і викликає смертність риб навіть за відносно низьких концентрацій (Henriksen et al., 1989).

Також атмосферне осідання важких металів призводить до накопичення токсикантів у біоті, включаючи риб. Вони здатні викликати хронічні отруєння, мутації, зниження репродуктивної здатності та імунних функцій. Метали накопичуються у зябрах, печінці, нирках та м'язовій тканині риб, що не лише впливає на стан популяцій, а й становить ризик для здоров'я споживачів рибної продукції (Kallio et al., 2022)[35].

Атмосферне надходження азотних і фосфорних сполук (особливо у формі нітратів і амонію) підсилює евтрофікацію, сприяючи цвітінню води, зменшенню прозорості та денному коливанню рівнів кисню. Ці процеси супроводжуються гіпоксією в придонних шарах, що особливо небезпечно для донних видів риб (наприклад, сом, лящ), які втрачають притулки та кормові ресурси. Внаслідок таких змін спостерігається спрощення іхтіофауни, витіснення чутливих видів та домінування більш толерантних (наприклад, карась, плітка).

У деяких випадках атмосферні осідання пестицидів і органічних мікрозабруднювачів (зокрема з полів або при трансграничному перенесенні) впливають на гормональну регуляцію риб, викликаючи ендокринні порушення, зміну поведінки, зниження фертильності та збільшення смертності личинок (Schäfer et al., 2011).

Таким чином, атмосферне осідання чинить комплексний вплив на іхтіофауну природних водойм, порушуючи як фізіологічні функції окремих організмів, так і структуру гідробіоценозів загалом. Урахування атмосферного

внеску є необхідним при розробці систем екологічного моніторингу та управлінні водними ресурсами, особливо у регіонах з високим рівнем техногенного навантаження.

Аквакультурні господарства, незважаючи на свою роль у забезпеченні продовольчої безпеки та зменшенні навантаження на природні популяції риб, можуть виступати джерелом антропогенного впливу на іхтіофауну природних водойм. Основні екологічні ризики пов'язані з надходженням у відкриті водойми надлишків кормів, продуктів метаболізму, залишків антибіотиків, дезінфектантів, а також із можливим втечею інтродукованих або генетично модифікованих особин (Ковтун, 2017; Boyd et al., 2020)[35].

Одним з головних шляхів впливу є органічне навантаження, що виникає внаслідок надмірного внесення кормів у відкриті садкові господарства. Частина корму не споживається рибою та осідає на дно, де розкладається, підвищуючи вміст органіки і біогенів (азоту, фосфору). Це призводить до розвитку евтрофікації, локального зниження вмісту кисню (гіпоксії), порушення структури бентосних угруповань і погіршення нерестових умов для природних популяцій (Lall, Tibbetts, 2009). У придонній зоні створюються "мертві зони", непридатні для існування багатьох видів риб, особливо донних[36].

Крім того, залишки лікарських препаратів, зокрема антибіотиків і протипаразитарних засобів, які застосовуються для профілактики хвороб у рибогосподарствах, можуть надходити у водойми. Це спричиняє розвиток резистентних штамів патогенів у природній іхтіофауні, змінює мікробні спільноти, а також порушує репродуктивні процеси в чутливих видів риб через дію фармакологічних компонентів як ендокринних дизрупторів (Cabello, 2006).

Особливої уваги заслуговує ризик, пов'язаний із втечею риб з аквакультурних установок, зокрема нехарактерних для місцевої фауни видів (наприклад, райдужна форель, тилапія, сом Кларіас). Такі види можуть вступати в конкуренцію за ресурси, витіснити автохтонних представників, передавати їм нові захворювання або змінювати трофічну структуру водойм (Naylor et al.,

2001). Особливо вразливими до таких змін є невеликі або ізольовані водойми, де баланс екосистем легко порушується навіть незначним зовнішнім втручанням.

Ще один аспект — генетичне забруднення, що виникає у разі схрещування втеклих штучно виведених риб з дикими популяціями. Такий обмін генетичним матеріалом може знижувати пристосованість природних риб до локальних умов, призводити до гібридизації та втрати унікальних генотипів, особливо у випадку з аборигенними або рідкісними видами (Hindar et al., 1991).

Таким чином, аквакультурні господарства можуть бути джерелом значного впливу на іхтіофауну природних водойм, що вимагає впровадження екологічно безпечних технологій ведення аквакультури: замкнених рециркуляційних систем, систем очищення стоків, біофільтрації, а також регламентування використання ветеринарних препаратів і контроль за втечами культивованих організмів.

Будівництво та експлуатація гідротехнічних споруд — дамб, водосховищ, каналів, гребель, шлюзів, берегоукріплень — є однією з найбільш масштабних форм антропогенного втручання у водні екосистеми, що має суттєвий і багатогранний вплив на іхтіофауну природних водойм. Ці інженерні об'єкти змінюють гідрологічний режим, морфометрію водойм, динаміку течій, температурні та кисневі характеристики, а також впливають на міграційну поведінку та відтворення риб (Petts, 1984; Жежерун, 2020).

Одним із ключових впливів гідротехнічних споруд є фрагментація річкових екосистем. Греблі та інші бар'єри перешкоджають вільній міграції риб, зокрема анадромних і катадромних видів (осетрові, лососеві, вугор), які потребують переміщення між морем і прісними водами для розмноження. Неможливість досягти традиційних нерестовищ призводить до скорочення чисельності популяцій або навіть до їх локального зникнення (Larinier, 2001). Навіть внутрішні міграції, пов'язані зі зміною сезонних стоянок, також можуть бути ускладнені або заблоковані[36].

Регулювання стоку змінює природний гідрологічний ритм рік, що негативно позначається на екологічних сигналах, які регулюють життєві цикли риб: нерест, харчування, зимівлю. Зокрема, зниження пікових весняних паводків унеможлиблює затоплення нерестових луків, що є критично важливими для багатьох фітофільних видів, таких як щука, лин, карась. Зменшення глибин або зупинка течії також змінює умови для аерації води, сприяє замуленню донних ділянок і зменшенню біорізноманіття (Bunn & Arthington, 2002)[36].

Унаслідок формування водосховищ відбувається трансформація річкових екосистем у стоячі, що спричиняє зміну домінуючих видів іхтіофауни: замість течієвих форм (марена, головень) з'являються стоякові види (плітка, окунь, лящ), тоді як спеціалізовані види можуть повністю зникати. Також спостерігається підвищення температури поверхневих шарів води, посилення стратифікації, зменшення кисню у придонних горизонтах, що погіршує умови для риб, які мешкають на глибинах (Sommer et al., 1997).

Берегоукріплення та днопоглиблювальні роботи руйнують прибережні біотопи, які є ключовими для годування та нересту риб. Знищення мілководних заростей макрофітів, піщано-галькових ділянок і затоплених дерев призводить до втрати середовищ існування для молоді та дрібних видів. Крім того, під час будівельних робіт можливе короткочасне, але сильне задимлення та завалювання русел, що викликає масову загибель іхтіофауни через механічне пошкодження або асфіксію.

Також гідротехнічне будівництво часто супроводжується вторгненням інвазивних видів, які швидко заселяють новостворені водосховища й витісняють аборигенну іхтіофауну. Наприклад, після створення Каховського водосховища у 1950-х роках відбулося масове розселення таких видів, як товстолобик і білий амур, які змінили структуру трофічних ланцюгів (Вовк, 2016)[36].

З огляду на вищезазначене, проєктування та експлуатація гідротехнічних споруд потребують впровадження екологічних компенсаційних заходів, зокрема: створення рибопропускних споруд, відтворення нерестовищ,

моніторингу гідробіоти та обов'язкового врахування екосистемного підходу до управління водними ресурсами.

Усі аспекти сучасної господарської діяльності людини можуть бути джерелом різноманітних форм забруднення водних екосистем. Лісозаготівля, осушення та зрошення територій, зміна русел річок, урбанізація, скидання промислових і побутових стоків, застосування мінеральних добрив, мийних засобів і пестицидів призводять до порушення природного режиму функціонування водних систем. Атомна промисловість також чинить негативний вплив через радіоактивні викиди, поховання відходів та скидання вод АЕС, що спричиняє радіоактивне забруднення водойм із подальшим накопиченням радіонуклідів у тканинах риби — як через воду, так і через об'єкти їхнього живлення[37].

Скиди теплого стоку з енергетичних підприємств викликають теплове забруднення, що несприятливо впливає на життєдіяльність водних організмів. У сільському господарстві пестициди та добрива потрапляють до водойм і можуть спричинити надлишок мінеральних речовин у воді. Особливо небезпечними для водної фауни є аміак і солі амонію, які навіть у низьких концентраціях викликають масову загибель організмів.

Разом із промисловими стоками у водойми потрапляють важкі метали, хлорорганічні сполуки, пестициди, нафтопродукти та інші токсиканти. Додаткову загрозу становлять оксиди азоту та сірки, які викидаються в атмосферу автотранспортом і промисловими підприємствами (рис. 2.2). У вигляді кислотних дощів ці сполуки спричиняють зниження рівня рН у водоймах. Зменшення кислотності має серйозні біологічні наслідки: при рН 6,5–6,0 гинуть ракоподібні, молюски, ікра риби і земноводних; при рН 6,0–5,0 відзначається загибель риби — форелі, плітки, окуня, щуки; подальше зниження до 4,5 і нижче призводить до повного зникнення життя у водоймі[38].

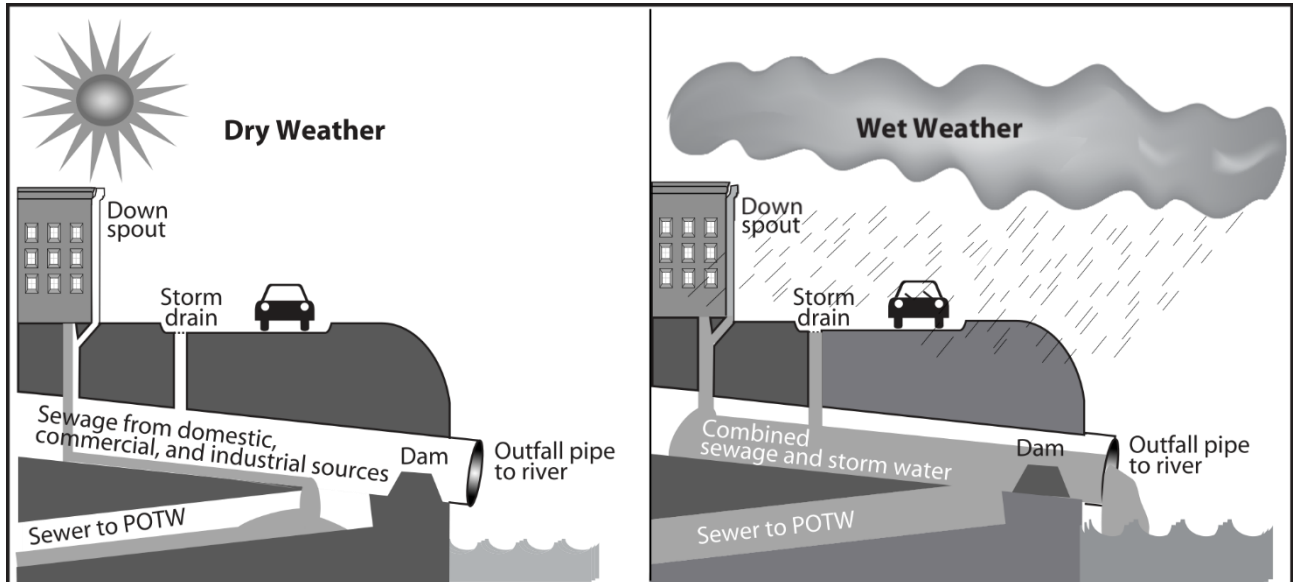


Рис. 2.2 - Комбінована каналізаційна система є можливим основним точковим джерелом забруднення води під час сильного дощу через перелив неочищених стічних вод. Стічні води з побутових, комерційних і промислових джерел надходять в систему через нижній вилів, а зливова вода надходить через зливову каналізацію. Під час сухої погоди (і невеликих штормів) всі стічні води обробляються державними очисними роботами (POTW). Гребля запобігає потраплянню сирих стічних вод у водойму через водовідвідну трубу. Під час вологої погоди (великих штормів) рельєфна конструкція дозволяє деяку частину комбінованих стічних і зливових вод скидати необробленої в прилеглий водойму.

Найбільш типовою формою забруднення є надходження до водойм значних обсягів органічних речовин, що легко розкладаються, а також біогенних елементів, які стимулюють розвиток органічної маси. Це спричиняє замулення дна, зростання кількості кормових ресурсів для детритофагів та мікроорганізмів, зниження концентрації розчиненого кисню, що безпосередньо змінює структуру біоценозів.

Для кількісного оцінювання рівня органічного забруднення використовується шкала сапробності, яка передбачає класифікацію водойм на ксеносапробні, олігосапробні, β -мезосапробні, α -мезосапробні та полісапробні.

Окрім органіки, хоча й у менших кількостях, водойми забруднюються пестицидами, продуктами нафтопереробки, солями важких металів, тепловим впливом, шумовими навантаженнями, радіацією та електромагнітним випромінюванням. Хоча структура забруднення є складною, встановлено, що організми, стійкі до органічного забруднення, зазвичай толерантні й до інших типів впливів. Саме тому показник сапробності використовується як універсальний критерій стійкості водних організмів до забруднення середовища.

Для біологічної індикації якості води можуть застосовуватись практично всі групи організмів, що мешкають у водоймах: бентосні й планктонні безхребетні, найпростіші, водорості, макрофіти, бактерії.

Організми, які найчастіше використовують як біоіндикатори, виконують важливі функції в процесах самоочищення водойм, беруть участь у формуванні первинної продукції та забезпечують трансформацію речовин у межах водних екосистем.

Склад і стан водної рослинності можуть свідчити про присутність забруднювальних речовин у районах, що зазнають впливу різних промислових об'єктів.

Наявність і просторовий розподіл водоростей є достовірним індикатором рівня забруднення та санітарного стану водних середовищ — морів, річок і озер. Деякі види водоростей зникають при наближенні до джерел забруднення, тоді як інші, зокрема морський салат *Ulva lactuca*, активно розмножуються у воді з підвищеним вмістом забруднювальних речовин[38].

У місцях скидання стічних вод зберігається лише бідна флора полісапробних водоростей, які здатні витримувати високі концентрації органічних домішок у воді та, відповідно, виступають індикаторами сильного органічного забруднення.

Бентосні водорості є ще точнішими індикаторами санітарного стану морських вод. У затоках Чорного моря в умовах чистої води мешкають десятки видів діатомових водоростей, які поступово зникають у міру зростання забрудненості. При незначному забрудненні з'являються полісапробні

діатомейні форми, такі як мелозіри та інші. Про сильне забруднення свідчить масове розмноження *Melosira moniliformis*.



Рис. 2.3 – «Цвітіння» води

Бентосні водорості є ще точнішими індикаторами санітарного стану морських вод. У затоках Чорного моря в умовах чистої води мешкають десятки видів діатомових водоростей, які поступово зникають у міру зростання забрудненості.

При незначному забрудненні з'являються полісапробні діатомейні форми, такі як мелозіри та інші. Про сильне забруднення свідчить масове розмноження *Melosira moniliformis*.

Наявність небезпечної забруднювальної речовини у водоймі також може бути встановлена шляхом фіксації токсичного впливу на рибу, що проявляється у зміні їх фізіологічного стану або поведінки[39].

Встановлено, що чутливість до нестачі кисню тісно корелює з чутливістю до органічного забруднення. Залежно від стійкості до дефіциту кисню та концентрації органічних речовин у воді, організми поділяють на індикаторні групи:

– Полісапроби — це організми, які здатні виживати за умов значного кисневого дефіциту. До них належать, зокрема, личинки комара *Chaoborus* та мухи-бджоловидки *Fristalis tenax*.

– Мезосапроби — витримують лише помірний рівень забруднення. Прикладами таких організмів є інфузорія *Paramecium*, а також риби: карась, короп, лин.

– Олігосапроби — організми, які чутливі до забруднення й потребують високого вмісту розчиненого кисню у воді. До цієї групи належать форель і багато личинок мошок[39].

Потреба у кисні є видовою ознакою і відрізняється у різних риб. Форель потребує високої концентрації кисню — від 7 до 11 см³/л. Піскар і коблик мають середній рівень потреби — 5–7 см³/л. Для таких видів, як плотва і йорж, характерна низька потреба — близько 4 см³/л, а для коропа та лина — дуже низька, на рівні приблизно 0,5 см³/л.

Гідробіологічні показники якості води — це сукупність кількісних і якісних характеристик угруповань водних організмів, які використовуються для визначення еколого-санітарного стану водних екосистем[39].

Якість водного середовища оцінюють через реакцію гідробіонтів на вплив забруднювальних чинників. Основними індикаторами-гідробіонтами вважаються зообентос, перифітон, зоопланктон і фітопланктон.

Зообентос — це сукупність організмів, які мешкають на дні або в донних відкладеннях морських і прісноводних водойм. Стан цього угруповання відображає тривалі зміни в характеристиках водного середовища.

Аналіз зообентосу, відібраного з різних ділянок водойми, дозволяє здійснити інтегральну оцінку якості води та визначити рівень забруднення донного субстрату[39].

Перифітон включає угруповання водних організмів — рослин і тварин — які прикріплюються до підводних субстратів: каменів, скель, суден, палів та інших об'єктів. Його дослідження дозволяє оцінити усереднені показники якості води за тривалий період часу, а також встановити наявність забруднення,

зокрема в разі, коли вода вже пройшла стадію самоочищення, але токсичні речовини залишилися в перифітоні[39].

Зоопланктон — це комплекс тварин, що мешкають у товщі води й переміщуються течією пасивно. Він є надійним біоіндикатором у слабо проточних водоймах — таких як ставки, водосховища, озера та спокійні річки. Його аналіз дозволяє швидко оцінити якість води в конкретних контрольних точках протягом коротких проміжків часу.

Фітопланктон — це угруповання автотрофних організмів, які живуть у товщі води й також переносяться течіями. Показники фітопланктону відображають якість води у тих зонах, де він розвивався, тому при дослідженні водотоків проби відбирають нижче за течією, що дозволяє з'ясувати рівень забруднення на попередніх ділянках водойми[39].

Оцінювання якості води у водоймах і водотоках здійснюється із застосуванням фізико-хімічних та біологічних методів. Біологічні методи базуються на аналізі стану водної екосистеми через вивчення складу рослинних і тваринних організмів, що її населяють.

Кожна водна екосистема, перебуваючи в динамічній рівновазі з факторами навколишнього середовища, формує складну систему біологічних взаємозв'язків, які порушуються під впливом антропогенних чинників. Насамперед, вплив забруднення позначається на видовому складі водних угруповань і співвідношенні чисельності окремих видів.

Біологічні методи оцінки стану водойм дозволяють отримати інформацію, яку неможливо здобути за допомогою суто фізичних або хімічних методів.

Оцінка рівня забруднення за допомогою гідробіонтів забезпечує швидке встановлення санітарного стану водойми, визначення характеру і поширення забруднення, а також надає можливість кількісно охарактеризувати перебіг процесів природного самоочищення[39].

2.2 Хімічний склад води та його вплив на аквакультуру

Хімічний склад води є одним із ключових екологічних чинників, що визначають умови існування гідробіонтів та ефективність функціонування аквакультурних систем. Вода виконує в аквакультурі не лише роль середовища існування, а й бере участь у багатьох фізіологічних процесах — диханні, осморегуляції, живленні, рості та розмноженні організмів. Тому навіть незначні зміни в хімічному складі води можуть суттєво впливати на стан здоров'я, продуктивність і життєздатність вирощуваних видів[40].

До основних показників хімічного складу води належать: розчинений кисень, вуглекислий газ, амоній, нітрити, нітрати, фосфати, солі кальцію, магнію, натрію, а також водневий показник (рН). Кожен з цих параметрів має свої оптимальні межі, за яких гідробіонти можуть нормально функціонувати. Наприклад, для більшості видів риб оптимальна концентрація розчиненого кисню становить не менше 5–6 мг/л. Зниження цього показника призводить до кисневого голодування, уповільнення обміну речовин, а у критичних випадках — до масової загибелі організмів.

Важливим елементом водного середовища є вуглекислий газ. У помірних концентраціях він бере участь у формуванні буферної системи водойми, однак у надлишку спричиняє закислення води, що негативно впливає на дихальні процеси. Значення рН, або кислотно-лужний баланс, також має суттєве значення: його відхилення від норми (6,5–8,5) порушує функціонування клітинних структур, підвищує токсичність аміаку та важких металів.

Серед найбільш небезпечних для гідробіонтів форм сполук виділяють аміак, нітрити та сірководень. Аміак утворюється в результаті розкладу органічних речовин і виділяється в процесі метаболізму тварин. За високих температур і значеннях рН аміак переходить у токсичну форму (NH_3), яка навіть у малих концентраціях викликає інтоксикацію, ураження зябер, розлади дихання. Нітрити, що є проміжними продуктами нітрифікації, викликають у риб метгемоглобінемію, тобто порушення транспорту кисню в організмі.

Сірководень, який утворюється в анаеробних умовах, є надзвичайно токсичним і блокує дихальні ферменти.

Окрім неорганічних сполук, важливе значення мають іонний склад та мінералізація води. Кальцій і магній формують жорсткість води, впливають на формування скелета, панцирів, осморегуляцію. Дефіцит або надлишок мінеральних солей знижує імунітет гідробіонтів, уповільнює їхній ріст і розмноження.

У сучасних умовах значної загрози набуває присутність у воді токсичних речовин антропогенного походження — важких металів (кадмій, свинець, ртуть, цинк), пестицидів, нафтопродуктів, залишків фармацевтичних препаратів. Вони мають кумулятивну дію, тобто накопичуються у тканинах організмів, пригнічують функції нервової, ендокринної та репродуктивної систем, можуть спричинити загибель молоді та зниження товарної якості продукції аквакультури.

Таким чином, хімічний склад води є визначальним фактором, який безпосередньо впливає на стан та біологічну ефективність аквакультурних об'єктів. Для успішного вирощування гідробіонтів необхідно постійно контролювати основні показники водного середовища, своєчасно виявляти відхилення та вживати заходів для їхнього усунення. Лише за умов стабільної хімічної рівноваги можливо забезпечити високі показники росту, збереження здоров'я, рентабельність виробництва та безпечність продукції для споживачів[40].

Аквакультура охоплює не лише вирощування риб, але й низку інших гідробіонтів, серед яких особливе місце займають двостулкові молюски (мідії, устриці), ракоподібні (креветки, раки), водорості (ламінарія, ульва, спіруліна) та інші водні організми. Хімічний склад водного середовища є одним із визначальних чинників, який безпосередньо впливає на фізіологічний стан, продуктивність, темпи росту, відтворення та імунологічну реактивність аквакультурних організмів. Відхилення основних хімічних параметрів, таких як вміст кисню, рН, солоність, концентрації аміаку, нітритів, важких металів,

можуть призводити до стресу, порушення метаболізму або навіть масової загибелі особин[40].

Молюски, зокрема устриці та мідії, є фільтраторами і напряду залежать від якості води, у якій вони утримуються. Основним параметром для їх нормального розвитку є концентрація кальцію, яка визначає міцність і формування черепашки. Оптимальний рівень Ca^{2+} у воді має бути не нижче 20 мг/л. Водночас, надлишкова жорсткість, у поєднанні з високим рН, може утворювати карбонатні опади на зябрах або поверхні молюсків[41].

У випадку вирощування креветок (наприклад, *Litopenaeus vannamei*), критичними є концентрації сполук азоту – аміаку ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), нітритів (NO_2^-) та нітратів (NO_3^-), які утворюються внаслідок розкладу органічних залишків. Несприятливі рівні цих речовин можуть пригнічувати дихання, пошкоджувати зябра та знижувати прирости.

Водорості, особливо мікродорості (наприклад, *Chlorella*, *Spirulina*), чутливо реагують на мінеральний склад води, зокрема концентрації фосфатів, нітратів, калію, сульфатів, а також важливі мікроелементи – Fe, Mg, Zn. Баланс між цими речовинами є вирішальним для фотосинтетичної активності, біомаси та вмісту білків чи пігментів (каротиноїдів, фікобілінів тощо)[41].

Таблиця 2.1 - Ключові хімічні параметри води для основних об'єктів аквакультури (адаптовано з [1], [2], [3])

Параметр	Мідії та устриці	Креветки (<i>L. vannamei</i>)	Спіруліна (<i>Arthrospira platensis</i>)
Температура, °C	15–25	27–32	30–35
рН	7.5–8.5	7.8–8.5	9.5–10.5
Кальцій, мг/л	≥20	40–80	40–100
Розчинений кисень, мг/л	≥5	≥4	>3

Параметр	Мідії та устриці	Креветки (<i>L. vannamei</i>)	Спіруліна (<i>Arthrospira platensis</i>)
Амоній (NH ₄ ⁺), мг/л	<0.1	<0.05	<0.5
Нітрити (NO ₂ ⁻), мг/л	<0.05	<0.1	<0.5
Нітрати (NO ₃ ⁻), мг/л	<10	<50	10–100
Солоність, ppt	25–35	15–35	20–70

Таблиця 2.2 - Вплив хімічних чинників на продуктивність і виживання аквакультурних організмів

Чинник	Біологічний ефект	Приклад
Підвищений амоній	Токсичність, порушення обміну речовин	Загибель до 50% молоді креветок при >0.1 мг/л NH ₃
Зниження рівня Ca ²⁺	Деформація черепашки, зниження фільтраційної активності	Мідії <i>Mytilus galloprovincialis</i>
Високий рівень рН (>10)	Порушення синтезу хлорофілу, зменшення росту	Пригнічення біомаси <i>Spirulina platensis</i>
Низька концентрація заліза	Зменшення фотосинтезу, нестача пігментів	Зниження вмісту фікоціаніну в <i>Chlorella</i>

Таким чином, оптимізація хімічного складу води є базовою умовою для ефективного ведення аквакультури. Успішне культивування нем'ясових гідробіонтів вимагає постійного моніторингу фізико-хімічних параметрів, зокрема рівня амонію, рН, вмісту мікроелементів, розчиненого кисню,

жорсткості води та солоності. Комплексний підхід до управління водним середовищем дозволяє не лише підтримувати життєздатність популяцій, а й досягати високої продуктивності у вирощуванні альтернативних об'єктів аквакультури, що має велике значення у контексті продовольчої безпеки та сталого розвитку[41].

2.3 Біологічні фактори, що визначають екологічний стан водойм

Біологічні фактори є одним із ключових показників, що визначають екологічний стан природних водойм. Саме живі організми першими реагують на зміни у водному середовищі, тому аналіз біологічних показників дозволяє оцінити не лише поточний стан екосистеми, а й виявити довготривалі тенденції її змін. Біологічні критерії відображають ступінь забруднення, продуктивність, стабільність та здатність екосистеми до саморегуляції.

Одним із основних біологічних показників є рівень біорізноманіття гідробіонтів — фітопланктону, зоопланктону, зообентосу, макрофітів, риб. У водоймах із добрим екологічним станом переважають різноманітні види, включно з чутливими до забруднення. Натомість у деградованих умовах спостерігається домінування невибагливих форм, стійких до токсичних або гіпоксичних умов (наприклад, синьо-зелені водорості, мотиль). Зменшення видового складу, поява патогенних мікроорганізмів або інвазивних видів свідчать про порушення екологічного балансу[42].

Важливим фактором є сапробність біоценозів — тобто здатність організмів витримувати певний рівень органічного забруднення. У водоймах із високим рівнем органічного навантаження переважають альфасапробні види, які виживають у брудних водах. У водоймах із чистою водою — переважають олігосапробні організми. На основі цього розраховують індекс сапробності, який дозволяє кількісно оцінити ступінь забруднення.

Значну роль у діагностиці екологічного стану відіграє структура біоценозів. У стабільних екосистемах спостерігається чіткий розподіл трофічних

рівнів, гармонійна взаємодія між організмами, достатній розвиток природної кормової бази. Порушення цієї структури — домінування окремих видів, спрощення харчових зв'язків або масова загибель організмів — свідчить про деградацію екосистеми[43].

Особливо інформативним є аналіз рівня первинної продукції, що визначається активністю фітопланктону. Надмірне «цвітіння» води часто є ознакою евтрофікації — насичення водойми біогенними речовинами. Унаслідок цього знижується прозорість, порушується газовий обмін, уночі може виникати дефіцит кисню, що призводить до стресу або загибелі риб.

Велику увагу приділяють оцінці стану рибної фауни. Риби, як вищі ланки трофічного ланцюга, є чутливими до якості середовища. Масова загибель риби, патології, зниження темпів росту, відсутність молоді або зникнення аборигенних видів свідчать про погіршення стану водойми. Особливо важливо фіксувати появу інвазивних або синантропних видів, які витісняють місцеву фауну та порушують природний баланс[44].

Біологічні фактори є надзвичайно важливими для всебічної оцінки екологічного стану водойм. Вони дозволяють виявити не лише безпосередні наслідки забруднення, а й довгострокові екологічні зміни. Саме тому біомоніторинг є обов'язковим елементом системи екологічного контролю та основою для прийняття природоохоронних рішень, особливо у водоймах, що використовуються для рибництва, аквакультури, водопостачання чи рекреації.

Методи біотестування найбільш широко розроблені саме для гідробіонтів і дозволяють ефективно застосовувати їх для визначення токсичності забруднюючих речовин у природних водах, контролю якості стічних вод, оперативного аналізу у санітарно-гігієнічних цілях, а також у лабораторній практиці для хімічних досліджень та розв'язання низки прикладних задач[45].

У разі надходження до водойми токсичних речовин із промисловими стоками спостерігається пригнічення розвитку фітопланктону та зниження його біорізноманіття. Натомість надходження побутових стоків, збагачених біогенними елементами, стимулює зростання продуктивності фітопланктону. При надмірному накопиченні біогенів відбувається масовий розвиток

водоростей — так зване «цвітіння» води, що супроводжується фарбуванням її у зелений, синьо-зелений, жовто-бурий або червоний кольори. Зазвичай це явище виникає за наявності сприятливих умов для активного розвитку одного або кількох видів фітопланктону[46].

Розкладання надмірної біомаси супроводжується утворенням сірководню та інших токсичних сполук, що може призвести до загибелі тваринних угруповань і зробити воду непридатною для питного використання. Крім того, деякі види планктонних водоростей у процесі життєдіяльності продукують токсичні речовини. Надлишок біогенних елементів у водоймах, спричинений господарською діяльністю людини, та пов'язане з цим надмірне зростання фітопланктону отримали назву антропогенного евтрофікування.

Хорошим біоіндикатором чистоти водного середовища є водорість Носток сливоподібна. Її присутність свідчить про сприятливий стан водойми. Ознакою погіршення якості води є деформація зовнішнього вигляду цієї водорості — зменшення розміру та порушення правильної округлої форми смарагдових «куль»[47].

Активне розмноження інших представників синьо-зелених водоростей, зокрема осциляторій, вказує на серйозне забруднення водойми органічними сполуками.

Надійним індикатором небезпечного забруднення також слугують прибережні обростання, що формуються на підводних об'єктах у прибережній зоні. У чистих водах такі обростання мають яскраво-зелений або бурий відтінок. За умов надмірної концентрації органічних речовин і підвищеної мінералізації води вони набувають синьо-зеленого кольору, оскільки домінують у них ціанобактерії (синьо-зелені водорості)[48].

Високу ефективність в екологічному моніторингу демонструє аналіз бентосних безхребетних. Оцінка чистоти водойм базується на наявності або відсутності певних таксономічних груп, які мають різну чутливість до забруднення.

Найбільш вивченою екологічною групою водоростей є фітопланктон. Він має високу видову різноманітність, а його кількісний і якісний аналіз є невід'ємною частиною програм моніторингу стану водойм.

Дослідження фітопланктону проводиться шляхом відбору проб у встановлених точках спостереження. Зразки аналізуються мікроскопічно: на предметне скло наносять краплю матеріалу, накривають покривним склом і ідентифікують види за спеціальними визначниками.

Синьо-зелені водорості (ціанобактерії) належать до прокаріотів, є повсюдно поширеними та здатні існувати в екстремальних умовах — наприклад, у гарячих джерелах чи посушливих кам'янистих регіонах[49].

Діатомові водорості — це мікроскопічні фотосинтезуючі організми, які зустрічаються в усіх типах водойм. Вони формують основу продуцентного рівня водної екосистеми і слугують їжею для безхребетних і деяких риб. Водночас їх масовий розвиток може мати негативні наслідки — погіршення якості води, загибель личинок риб через закупорення зябер. Багато видів діатомей мають індикаційне значення у визначенні якості води[50].

Зелені водорості є одним із найбільших відділів водоростевого світу. Евгленові водорості, характерні для прісноводних водойм із високим вмістом органіки, мають характерні червоні гранули в клітинах. Їх масове розмноження може призводити до утворення червонуватого нальоту на поверхні води, а деякі види спричиняють «цвітіння», змінюючи забарвлення води на бурий[51].

Золотисті водорості — це переважно прісноводні мікроскопічні організми, які найчастіше зустрічаються в екологічно чистих водоймах. Їхнє активне розмноження зазвичай припадає на холодні пори року, що робить їх показовими індикаторами сезонної динаміки екосистем[52].

Дінофітові водорості поширені як у прісних, так і в морських водоймах. Серед представників цієї групи зустрічаються паразитичні форми, здатні уражати личинок устриць, а також види, що продукують токсини, які є смертельно небезпечними для риб. Крім того, після масового розмноження — так званих «червоних припливів» — ці водорості, розкладаючись, виділяють

шкідливі продукти розпаду, які можуть на великі відстані отруювати воду, негативно впливаючи на стан риби та інших мешканців водойм[53].

Таблиця 2.1 – Види забруднюючих речовин у воді

Характер запаху води	Речовини, що забруднюють воду
Хімічний	Промислові стічні води, хімічна обробка води
Хлорний	Вільний хлор
Вуглеводневий (нафтовий)	Стоки нафтоочисних заводів, АЗС
Затхлий	Органічні речовини
Лікарський	Феноли і йодоформ
Неприємний або сильно виражений неприємний	Сірководень – показник сильного забруднення води гниючими тваринними залишками
Огірковий, квітковий	Ароматичні вуглеводи
Гнильний	Застояні стічні води, затхлий
Землистий, прілий, свіжозораної землі, глиняний	Сира земля
Рибний	Риба, риб'ячий жир
Дерев'яний	Деревної кори, мокрої щіпки
Невизначений	Не підходить до жодного із названих

Підкреслюючи значущість методів біоіндикації як інструменту дослідження, слід зазначити, що цей підхід дозволяє виявляти фактичне або поточне забруднення навколишнього середовища, спираючись на функціональні особливості окремих організмів та екологічні характеристики їхніх угруповань. Поступова зміна видового складу відбувається внаслідок тривалого токсичного навантаження на водойму, і такі зміни стають помітними лише тоді, коли екосистема зазнає глибоких і вже незворотних змін[54].

Для річкових систем і струмків найбільш достовірні результати отримують за рахунок аналізу донних організмів (бентосу) та перифітону — мешканців

прикріплених підводних субстратів. Оскільки ці організми не пересуваються разом із потоком води, вони об'єктивно відображають її якість у конкретній ділянці. У стоячих водоймах, крім бентосу, доцільно досліджувати також планктон — організми, що населяють товщу води[55].

Біоіндикація може здійснюватися на основі показників біосистем різного рівня організації. Як правило, чим нижчий таксономічний ранг біосистеми, що використовується як індикатор (наприклад, окрема особина або популяція), тим точніше можна встановити специфічний вплив факторів навколишнього середовища. І навпаки, чим вищий рівень біоіндикаторної системи (екосистема, біоценоз), тим ширше, але менш детально виявляється характер змін у середовищі[56].

3 ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОЛІПШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРИ

3.1 Загрози забруднення водойм і їх наслідки для аквакультури

Забруднення водойм є однією з головних екологічних загроз сучасного світу, яка має критичний вплив на стабільність водних екосистем і безпосередньо впливає на розвиток аквакультури. В умовах інтенсивного господарського використання водних ресурсів, зокрема для потреб сільського господарства, промисловості та урбанізованих територій, значно зростає обсяг надходжень у водойми шкідливих речовин — як органічного, так і неорганічного походження. Наслідки таких процесів для аквакультурного виробництва є багатограними і охоплюють біологічні, технологічні, економічні та санітарно-гігієнічні аспекти[57].

До основних джерел забруднення водойм, які становлять небезпеку для аквакультури, належать скиди неочищених або недостатньо очищених стічних вод, надходження сільськогосподарських добрив і пестицидів, викиди важких металів, органічних сполук та мікропластику[58].

Таблиця 3.1 - Основні види забруднення водойм і їх наслідки для аквакультури

Тип забруднення	Джерело	Вплив на водне середовище	Наслідки для аквакультури
Біогенні речовини (нітрати, фосфати)	Добрива, стоки ферм	Євтрофікація, «цвітіння» води, гіпоксія	Масова загибель риби, зниження приросту

Тип забруднення	Джерело	Вплив на водне середовище	Наслідки для аквакультури
Органічні сполуки	Побутові та промислові стоки	Зростання БСК, зниження кисню	Порушення метаболізму у риб
Важкі метали (Cd, Pb, Hg)	Промислові підприємства	Акумуляція в донних відкладеннях, токсичність	Біоаккумуляція в рибі, ризики для споживачів
Пестициди	Агропромисловий сектор	Токсичність для планктону та риб	Зниження виживаності мальків
Мікропластик	Побутові відходи	Фізичне забруднення, порушення травлення у риб	Зниження якості продукції

Характерними ознаками таких забруднень є евтрофікація, зниження рівня розчиненого кисню, токсичність середовища та порушення трофічних зв'язків у біоценозах. У таблиці подано основні види забруднення, їх джерела та вплив на водну екосистему і аквакультуру[59].

Наслідки забруднення водойм для аквакультури проявляються на різних рівнях. На біологічному рівні відбувається зменшення чисельності природного зоопланктону — основного корму для багатьох видів риб у ранніх стадіях розвитку. Це безпосередньо впливає на ріст, розвиток і виживаність молоді. Крім того, підвищення концентрацій токсикантів у воді зумовлює стресові реакції у риб, пригнічує імунітет та сприяє розвитку інфекційних захворювань. На фізіологічному рівні вплив забруднень проявляється у порушеннях газообміну, зміні гормонального фону, ураженні внутрішніх органів[60].

З технологічного погляду, забруднення ускладнює управління процесами вирощування — виникає необхідність у частішому оновленні води, зміні раціонів, застосуванні медикаментів. Це підвищує собівартість продукції і

знижує її рентабельність. З санітарно-епідеміологічної точки зору, споживання риби, вирощеної у забрудненій воді, є потенційно небезпечним для здоров'я людини, особливо у разі акумуляції важких металів або хімічних сполук у м'язовій тканині. У таблиці нижче наведено деякі приклади меж допустимої концентрації токсичних речовин у воді для рибницьких господарств[61].

Таблиця 3.2 - Допустимі концентрації токсичних речовин у воді для потреб аквакультури (згідно FAO, WHO, ДСТУ)

Речовина	Максимальна допустима концентрація (мг/дм³)	Вплив на рибу
Амоній (NH ₄ ⁺)	≤ 0,2	Ураження зябер, токсикоз
Нітрити (NO ₂ ⁻)	≤ 0,1	Порушення дихання (метгемоглобінемія)
Свинець (Pb)	≤ 0,01	Накопичення в печінці, ураження ЦНС
Кадмій (Cd)	≤ 0,005	Порушення функцій нирок і печінки
Пестициди (загальні)	≤ 0,0001	Летальність для планктону і мальків

Таким чином, збереження якості водного середовища є ключовою умовою для сталого розвитку аквакультури. Ефективне управління загрозами забруднення повинно включати як превентивні заходи (очищення стічних вод, регламентація сільськогосподарської діяльності в межах водозбірних басейнів), так і моніторинг якості води в реальному часі з подальшим коригуванням виробничих практик. Також важливо впроваджувати принципи інтегрованого управління водними ресурсами (IWRM) відповідно до міжнародних зобов'язань України, зокрема Рамкової водної директиви ЄС (2000/60/ЕС), що передбачає

екосистемний підхід і орієнтацію на досягнення доброго екологічного стану водойм[62,63,64].

3.2 Оцінка стійкості водних екосистем до антропогенного впливу

Стійкість водних екосистем до антропогенного впливу є однією з ключових характеристик, що визначає здатність екосистем зберігати свою функціональну цілісність, біорізноманіття та екологічні процеси під дією зовнішніх навантажень. У контексті розвитку аквакультури, водокористування, урбанізації та змін клімату питання стійкості набуває особливої актуальності, оскільки саме від неї залежить довготривала екологічна і продуктивна стабільність водойм[57].

Стійкість (resilience) розглядається як здатність водної екосистеми повернутися до вихідного стану після порушень або адаптуватися до нових умов без втрати основних екологічних функцій. Її визначають через взаємодію комплексу чинників, зокрема: ступеня біологічного різноманіття, наявності буферних елементів (болота, заплави), гідроморфологічної цілісності, а також хімічного складу води. Для комплексної оцінки використовуються біоіндикаторні методи, математичне моделювання, багатофакторний аналіз та індекси екологічного стану (наприклад, індекс BMWP, ASPT, WFD Ecological Quality Ratio тощо)[65,66].

Таблиця 3.3 - Основні фактори, що визначають стійкість водних екосистем до антропогенного впливу

Категорія чинників	Приклад показників	Вплив на стійкість
Біологічне різноманіття	Індекс Шеннона, кількість таксонів макрозообентосу, зоопланктону	Вища різноманітність забезпечує більшу буферну здатність

Категорія чинників	Приклад показників	Вплив на стійкість
Гідроморфологія	Наявність заплав, глибина, швидкість течії	Природна структура сприяє поглинанню стресу
Хімічні параметри	pH, вміст кисню, рівень забруднення	Чисте середовище підвищує адаптаційні можливості
Режим водообміну	Проточність, наявність стоячих ділянок	Забезпечує самоочищення та регенерацію
Людське навантаження	Урбанізація, скиди, аграрне навантаження	Зниження стійкості через зовнішній тиск

Методики кількісної оцінки стійкості екосистем включають аналіз просторово-часової стабільності біоіндикаторів, а також розрахунок індексів, що враховують чутливість певних таксонів до забруднень. У європейській практиці поширеним є застосування індексу BMWP (Biological Monitoring Working Party), що ґрунтується на різній чутливості водних організмів до органічного забруднення. Індекс ASPT (Average Score Per Taxon) дозволяє враховувати кількість таксонів з урахуванням їх «екологічної ваги»[67].

Таблиця 3.4 - Оцінка стійкості водойм за біоіндикаторними методами (на прикладі BMWP-ASPT)

Категорія екологічного стану	BMWP (сума балів)	ASPT (середній бал на таксон)	Інтерпретація
Дуже добрий	> 100	> 6,5	Стійка екосистема,

Категорія екологічного стану	BMWP (сума балів)	ASPT (середній бал на таксон)	Інтерпретація
			високий рівень очищення
Добрий	71–100	5,5–6,5	Помірна стійкість, ознаки впливу
Задовільний	41–70	4,5–5,4	Обмежена здатність до саморегуляції
Поганий	21–40	3,5–4,4	Високий тиск, порушені функції
Дуже поганий	< 20	< 3,5	Деградована екосистема, низька стійкість

Важливим аспектом є оцінка так званих референсних умов — тобто природного або малопорушеного стану водойми, з яким порівнюється поточний стан. У рамках Водної рамкової директиви ЄС (2000/60/ЕС) стійкість пов'язується з досягненням «доброго екологічного стану» як базового нормативу. Зокрема, вважається, що екосистема, яка відповідає референсному або наближеному до нього рівню, має вищу здатність протистояти змінам середовища та відновлюватися після порушень[68].

У вітчизняній практиці оцінка стійкості водних об'єктів зазвичай здійснюється через поєднання гідробіологічного моніторингу, даних про фізико-хімічний стан та моделювання гідрологічного режиму. У таблиці нижче наведено приклади застосування підходів до оцінки стійкості в різних типах водойм.

Таблиця 3.5 - Порівняльна характеристика стійкості різних типів водойм України

Тип водойми	Середній ВМWP	Домінуючі таксони	Рівень антропогенног о навантаження	Інтерпретаці я стійкості
Гірські річки (Карпати)	120	Ефемероптери , плекоптери	Низький	Висока стійкість, референсна система
Рівнинні річки (Центр України)	65	Олігохети, хирономіди	Середній	Помірна стійкість, часткове забруднення
Ставки в агрolandшафта х	35	Хирономіди, тубіфіциди	Високий	Низька стійкість, необхідність втручання
Канали меліоративні	< 25	Домінують евритолерантн і види	Дуже високий	Дуже низька стійкість, порушені функції

Таким чином, комплексна оцінка стійкості водних екосистем є необхідною складовою управління водними ресурсами, особливо в умовах зростання екологічного навантаження. Розробка інструментів оцінки та впровадження екосистемного підходу до управління сприяє адаптації аквакультурного виробництва до умов змінного середовища, мінімізації ризиків деградації водойм та забезпеченню їх довготривалої екологічної стабільності[69].

3.3 Шляхи поліпшення екологічного стану водойм для сталого розвитку аквакультури

Поліпшення екологічного стану водойм є необхідною та стратегічно важливою умовою для забезпечення сталого розвитку аквакультури, яка базується на використанні водних екосистем із стабільними гідробіологічними, хімічними та гідроморфологічними параметрами. В умовах інтенсифікації кліматичних змін, збільшення антропогенного навантаження та зростаючої деградації водного середовища, актуальності набуває впровадження цілісного комплексу заходів, спрямованих на відновлення та підтримання екологічної рівноваги водойм. Особлива увага має приділятися екосистемним принципам водокористування, які передбачають не лише технологічні рішення, але й біоінженерні та природоорієнтовані підходи[70].

Основними напрямками покращення екологічного стану водних об'єктів, що використовуються для аквакультурних потреб, є:

- Модернізація очисних споруд із застосуванням сучасних технологій доочистки стічних вод, таких як мембранні біореактори, адсорбційні фільтри, біокаталітичні системи та нанотехнології;
- Регулювання скидів забруднюючих речовин з аграрних, промислових і побутових джерел через вдосконалення дозвільної системи, впровадження екологічного нагляду та економічних стимулів до зменшення навантаження;
- Раціональне управління сільськогосподарськими стоками, включаючи організацію буферних смуг, впровадження практик точного землеробства, зниження використання агрохімікатів;
- Відновлення природних компонентів гідрологічного режиму, що передбачає реконструкцію русел, відновлення природної проточності, відтворення заплав та притаманних ландшафтних структур;
- Біоінженерні заходи, такі як фіторе mediaція, інсталяція біофільтрів з макрофітів і мікроводоростей, штучне зариблення з урахуванням екосистемних функцій видів;

- Розумне просторове планування, яке включає зонування водойм за функціональним навантаженням, обмеження інтенсивності рекреаційного тиску, інтеграцію збереження біотопів у регіональні стратегії;
- Екосистемний моніторинг та адаптивне управління, що базується на постійному зборі гідробіологічної інформації, біоіндикації, застосуванні моделей оцінки екологічного статусу та гнучкому прийнятті управлінських рішень.

Таблиця 3.6 – Комплекс заходів з покращення екологічного стану водойм для потреб аквакультури

Напрямок заходів	Конкретні дії	Очікуваний ефект
Модернізація очисних споруд	Установлення біофільтрів, мембранних реакторів, UV-дезінфекції	Зниження вмісту органіки, біогенів, патогенів
Управління сільськогосподарськими стоками	Буферні смуги, зменшення добрив, агролісомеліорація	Зменшення надходження нітратів і фосфатів
Відновлення гідрологічного режиму	Реставрація заплав, розчищення русел, контроль паводків	Підвищення самоочисної здатності екосистем
Біоінженерні рішення	Використання макрофітів, водоростей, біофільтраційних організмів	Біофільтрація забруднювачів, відновлення трофічних ланцюгів
Просторове планування	Обмеження інтенсивності рекреації, охоронні зони	Зниження фізичного навантаження та забруднення берегової зони

Напрямок заходів	Конкретні дії	Очікуваний ефект
Екосистемний моніторинг і управління	Біоіндикація, гідробіологічні індекси, GIS-моніторинг	Своєчасне виявлення ризиків, адаптивне реагування

Особливе значення в контексті відновлення водних екосистем та забезпечення умов для сталого аквакультурного виробництва відіграють **природоорієнтовані рішення** (*Nature-based Solutions, NbS*), що передбачають використання потенціалу самих екосистем для очищення, регуляції та стабілізації водного середовища. До таких рішень належать [70]:

- реконструкція заплав і каналів з метою відновлення проточності та гідрологічної динаміки;
- створення штучних та напівприродних водно-болотних угідь, які виконують функції біологічних фільтрів;
- заліснення або відновлення прибережних лісосмуг та лучно-болотних екотонів, що затримують поверхневий стік, фіксують забруднювачі та знижують ерозію берегів.

Ці заходи не лише сприяють очищенню води, а й підвищують екосистемну стійкість, відновлюють біорізноманіття, підтримують життєві цикли аборигенних видів та зменшують ризики, пов'язані з кліматичними екстремумами (засухи, паводки тощо) [71].

Таблиця 3.7 – Ефективність природоорієнтованих заходів для очищення води (на прикладі малих ставків)

Тип природоорієнтованого заходу	Зниження концентрації нітратів (%)	Зниження фосфатів (%)	Підвищення біорізноманіття	Стабілізація рівня води
Штучні водно-болотні угіддя	65–85	60–80	Високе	Помірна

Тип природоорієнтованого заходу	Зниження концентрації нітратів (%)	Зниження фосфатів (%)	Підвищення біорізноманітності	Стабілізація рівня води
Буферні смуги (30–50 м)	50–70	45–60	Середнє	Висока
Реставрація заплав	40–65	35–50	Високе	Висока
Прибережне заліснення	30–50	30–40	Середнє	Середня
Біофільтрація (макрофіти, водорості)	55–75	50–65	Високе	Низька

Не менш важливим є екологічне переосмислення самої аквакультурної практики. Перехід до рециркуляційних аквакультурних систем (RAS) дозволяє суттєво зменшити обсяг споживаної води, знизити викиди забруднюючих речовин та підвищити контроль за якістю середовища. Інтеграція мульти-трофічних систем (ІМТА), де різні гідробіоти взаємодіють у межах однієї системи (наприклад, риба, молюски та водорості), сприяє ефективному використанню ресурсів і зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Впровадження екологічної сертифікації аквакультурних господарств (ASC, GlobalG.A.P.) стимулює відповідальне управління, впровадження біобезпеки та сталих практик вирощування[72].

Таблиця 3.8 – Екологічні переваги різних моделей аквакультурного виробництва

Модель аквакультури	Водоспоживання	Забруднення водойм	Біобезпека	Можливість сертифікації	Потреба в площі
Традиційна ставкова	Високе	Високе	Низька	Обмежена	Висока

Модель аквакультури	Водоспожива ння	Забруднен ня водойм	Біобезпе ка	Можливіс ть сертифіка ції	Потре ба в площі
Напівінтенсив на	Середнє	Середнє	Середня	Помірна	Середн я
RAS (рециркуляцій на система)	Низьке	Дуже низьке	Висока	Висока	Низька
ІМТА (мультитрофіч на)	Середнє	Низьке	Висока	Висока	Середн я

Таким чином, досягнення екологічно безпечного, ресурсоефективного та продуктивного використання водойм для аквакультурних потреб потребує багаторівневої інтеграції інженерно-технологічних, біологічних і управлінських рішень. Стратегічною метою має стати забезпечення не лише короткотермінової економічної вигоди, але й довготривалої екосистемної стійкості, що можливо лише за умов застосування адаптивного моніторингу, багатосторонньої участі зацікавлених сторін та впровадження принципів природоорієнтованого управління водними ресурсами. У підсумку, синергія інновацій та екологічної відповідальності має стати основою майбутнього аквакультури в Україні[72].

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що екологічний стан природних водойм виступає ключовим чинником, який визначає функціональну ефективність та продуктивність аквакультурного виробництва. Проведений аналіз свідчить про те, що сприятливі гідрохімічні характеристики водного середовища, зокрема оптимальний рівень розчиненого кисню, помірна концентрація біогенних елементів, відсутність токсикантів і стабільні температурні режими, мають позитивний вплив на фізіолого-біохімічні процеси в організмах гідробіонтів, сприяючи високим темпам росту, ефективному відтворенню, покращенню імунологічного статусу та зниженню рівня інфекційних захворювань.

Натомість наявність у воді забруднювальних речовин антропогенного походження — зокрема, надлишкових концентрацій азотних і фосфорних сполук (внаслідок евтрофікації), важких металів, пестицидів, поліхлорованих біфенілів, а також мікропластику — створює значні загрози для аквакультурної продукції. Такі впливи призводять до фізіологічного стресу у риб, зниження темпів росту, порушення репродуктивної функції, кумуляції токсичних речовин у тканинах, що, у свою чергу, негативно впливає на якість та безпечність рибної продукції, зменшуючи її конкурентоспроможність на ринку. Крім того, зафіксовано зростання частоти летальних випадків серед молоді культивованих видів у періоди сезонних піків забруднення, зокрема в умовах низької проточності або підвищених температур.

Оцінка стійкості водних екосистем у рамках дослідження показала, що водойми з високим рівнем біорізноманіття, збереженою структурою гідроморфології, наявністю прибережної рослинності та буферних зон характеризуються вищим рівнем екосистемної резилієнтності. Такі системи демонструють здатність до саморегуляції, біологічної фільтрації та природного самоочищення, що забезпечує підтримання екологічної рівноваги навіть за помірного антропогенного навантаження. Водночас у водоймах із порушеним гідрологічним режимом, значною трансформацією берегової зони, регулярним

надходженням стічних вод і надмірною евтрофікацією відзначається втрата чутливих видів, спрощення структури угруповань, домінування евритолерантних організмів, зокрема синьо-зелених водоростей та дрібного зоопланктону, що призводить до розбалансування трофічних ланцюгів.

На основі результатів дослідження запропоновано низку екологічних, інженерних і управлінських заходів, що спрямовані на покращення якості водного середовища в контексті розвитку аквакультури. Зокрема, рекомендовано модернізацію та реконструкцію очисних споруд із впровадженням сучасних технологій доочистки води (біофільтрація, фотокаталіз, мембранні методи); створення прибережних буферних смуг із багаторічною рослинністю для фільтрації стоку; запровадження рециркуляційних систем водопостачання у рибних господарствах з метою зниження споживання та забруднення води; а також розвиток природоорієнтованих рішень (nature-based solutions), які включають відновлення заболочених ділянок, ландшафтне планування та інтеграцію екосистемних послуг у процес прийняття рішень.

Особливу увагу приділено необхідності запровадження постійного екосистемного моніторингу із застосуванням біоіндикаторних методів, супутникового спостереження, дистанційних сенсорів та геоінформаційних технологій для забезпечення оперативного реагування на зміни у водному середовищі. Такий підхід дозволить оптимізувати управління водними ресурсами з урахуванням довгострокової екологічної безпеки та економічної ефективності аквакультурної діяльності.

Отже, досягнення сталого розвитку аквакультури в Україні є можливим виключно за умови забезпечення високого екологічного статусу природних водойм. Це вимагає міждисциплінарного підходу, інтеграції наукових досліджень у сфері гідроекології, токсикології, біотехнологій, екологічного права та економіки природокористування. Водночас важливо забезпечити ефективну взаємодію між органами державної влади, науковими установами, представниками аквакультурного бізнесу та громадянським суспільством для створення цілісної системи управління водними ресурсами на засадах сталого розвитку, екосистемного підходу та адаптивного менеджменту.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 4808:2007. Якість води. Методики контролю.
2. Рамкова водна директива ЄС 2000/60/ЄС.
3. Водний кодекс України. — К.: Парламентське видавництво, 2022.
4. Романенко В.Д., Зуб Л.М., Оксіюк О.П. Основи гідроекології. — К.: Наукова думка, 2010.
5. Water Framework Directive: A practical guide. European Commission. Brussels, 2016.
6. Степаненко В.М. Екологія водних екосистем. — К.: Либідь, 2015.
7. Chapman D. (ed.). Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. – 2nd ed. – WHO, UNESCO, UNEP, 1996.
8. ДСТУ ISO 5667-6:2005. Якість води. Відбір проб. Частина 6. Настанови щодо відбору проб з річок та струмків.
9. Наказ МОЗ України №400 від 12.05.2010 "Про затвердження Державних санітарних норм та правил охорони поверхневих вод".
10. Романенко, В. Д. та ін. (2001). Методичні рекомендації з екологічної оцінки поверхневих вод за відповідними параметрами. Інститут гідробіології НАН України.
11. Прикладна гідробіологія: методи та підходи / За ред. В.Д. Романенка. – Київ: Логос, 2008.
12. Тищенко, П. І. (2012). Антропогенне навантаження на водні екосистеми України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія «Біологія», № 61, с. 24–30.
13. ДСТУ ISO 5667-6:2005. Якість води. Відбір проб. Частина 6. Керівництво щодо відбору проб з річок та потоків.
14. Жеребцова, І. А. (2019). *Гідроекологія: моніторинг водних екосистем*. Київ: Либідь.
15. Лось, В. А. (2018). *Основи гідрохімії*. Львів: ЛНУ ім. І. Франка.

15. Захарова, Л. Г. (2021). *Методи біологічного моніторингу прісноводних екосистем*. Харків: ВНТУ.
16. Sládeček, V. (1973). *System of Water Quality from the Biological Point of View*. Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol., 7, 1–218.
17. Kallio, K., et al. (2022). “Use of Remote Sensing and GIS in Water Quality Assessment.” *Water*, 14(5), 832.
18. Conrad, C.C., & Hilchey, K.G. (2011). “A review of citizen science and community-based environmental monitoring.” *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1-4), 273–291.
19. Water Framework Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000.
20. Біоіндикація стану водного середовища. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://kegt.rshu.edu.ua/images/dustan/INDL7.pdf>
21. Хільчевський В. К. Хімічний аналіз та оцінка якості природних вод : навч. посіб. / В. К. Хільчевський, М. Р. Забокрицька. Луцьк : Вежа-Друк. 2021. с. 76.
22. Жеребцова І. А. (2019). *Гідроекологія: моніторинг водних екосистем*. Київ: Либідь.
23. Лось В. А. (2018). *Основи гідрохімії*. Львів: ЛНУ ім. І. Франка.
24. Захарова Л. Г. (2021). *Методи біологічного моніторингу прісноводних екосистем*. Харків: ВНТУ.
25. Sládeček, V. (1973). *System of Water Quality from the Biological Point of View*. Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol., 7, 1–218.
26. Kowalczywska-Madura, K., et al. (2018). “Nutrient Pollution and Fish Community Structure in Shallow Lakes.” *Ecological Indicators*, 93, 1211–1220.
27. Brodin, T., et al. (2014). “Ecological Effects of Pharmaceuticals in Aquatic Systems.” *Environmental Science & Technology*, 48(6), 3084–3090.
28. Коржова Е. К. (2020). *Євтрофікація та її вплив на прісноводні екосистеми*. Санкт-Петербург: Наука.

29. Pacyna, E. G., Pacyna, J. M., & Aas, W. (2007). “Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium.” *Atmospheric Environment*, 43(7), 117–127.
30. Henriksen, A., et al. (1989). *Critical Loads of Acidity: Nordic Countries*. NORD Environment.
31. Kowalik, R. A., et al. (2021). “Atmospheric deposition and surface water acidification: impacts on fish populations.” *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3429–3440.
32. Kallio, K., et al. (2022). “Assessment of Heavy Metal Pollution in Freshwater Ecosystems.” *Water*, 14(8), 1234.
33. Schäfer, R. B., et al. (2011). “Effects of pesticides on community structure and ecosystem functions in agricultural streams of three biogeographical regions in Europe.” *Science of the Total Environment*, 382(1), 272–285.
34. Ковтун О. А. (2017). *Екологічні ризики інтенсивної аквакультури в Україні*. Вісник аграрної науки, №4, 59–64.
35. Boyd, C. E., Tucker, C. S., McNevin, A. A. (2020). *Aquaculture, Resource Use, and the Environment*. Wiley-Blackwell.
36. Lall, S. P., Tibbetts, S. M. (2009). “Nutrition, feeding, and behavior of fish in aquaculture.” *Applied Animal Behaviour Science*, 121(1), 1–12.
37. Cabello, F. C. (2006). “Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment.” *Environmental Microbiology*, 8(7), 1137–1144.
38. Naylor, R. L., et al. (2001). “Effect of aquaculture on world fish supplies.” *Nature*, 405(6790), 1017–1024.
39. Hindar, K., et al. (1991). “Genetic interactions between hatchery and wild salmonids: evidence from Norway.” *Aquaculture*, 98(1-3), 111–118.
40. Жежерун І. І. (2020). *Гідроекологічні наслідки антропогенної трансформації річкових екосистем*. Київ: Ін-т гідробіології НАН України.
41. Petts, G. E. (1984). *Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management*. John Wiley & Sons.

42. Bunn, S. E., Arthington, A. H. (2002). "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity." *Environmental Management*, 30(4), 492–507.
43. Larinier, M. (2001). "Environmental issues, dams and fish migration." *FAO Fisheries Technical Paper*, 419, 45–90.
44. Sommer, T., Baxter, R., Herbold, B. (1997). "Resilience of splittail in the Sacramento–San Joaquin estuary." *Transactions of the American Fisheries Society*, 126(6), 961–976.
45. Вовк Г. Г. (2016). *Інтродуковані види риб у водоймах Півдня України: наслідки і перспективи*. Одеса: Еко-Тех.
46. Boyd, C. E., Tucker, C. S. (2012). *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Springer Science & Business Media.
47. FAO (2020). *Water quality for aquaculture: A review of recent advances*. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 620. Rome.
48. Rittmann, B. E., McCarty, P. L. (2020). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. McGraw-Hill.
49. Поліщук, Л. М., Шевчук, О. М. (2019). Оптимізація параметрів водного середовища в умовах інтенсивного вирощування креветок. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, №1, с. 112–117.
50. Головченко, Л. М., Кравець, С. А. (2018). Біологія та культивування прісноводних двостулкових моллюсків в Україні. *Гідробіологічний журнал*, т. 54, № 2, с. 45–53.
51. Boyd, C.E. (1998). *Water Quality for Pond Aquaculture*. Auburn University, Alabama.
52. Романенко В.Д., Журавльова Л.А., Курило С.М. Якість води і режим у водоймах рибного господарства. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2005.
53. Chapman, D. (Ed.). (1996). *Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2nd ed.). WHO, UNESCO, UNEP.
54. Воловик С.П. Загрязнение водоемов тяжелыми металлами и их влияние на рыб. — М.: ВНИИПРХ, 2003.

55. Kakareka, S.V. (2017). *Heavy metals in freshwater ecosystems and their accumulation in fish tissues*. Environmental Chemistry Letters.
56. FAO (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action*. Rome.
57. Collard, F., et al. (2019). *Microplastics in freshwater fish: Evidence from French rivers and lakes*. Environmental Pollution.
58. WHO (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). Geneva: World Health Organization.
59. Hering, D. et al. (2006). The European Water Framework Directive: how to assess ecological status of surface waters. *Hydrobiologia*, 566(1), 1–20.
60. Біляк, Ю.Д., Лук'яненко, В.С. (2019). Гідробіологічна оцінка малих річок Українських Карпат. *Гідробіологічний журнал*, 55(2), 25–34.
61. Кучерук, Н.В., Ковальчук, І.П. (2020). Моніторинг рівнинних водойм за біоіндикаторними показниками. *Наукові записки ТНПУ ім. В. Гнатюка, серія "Біологія"*, №82.
62. Resh, V.H., Rosenberg, D.M. (1993). *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Chapman & Hall.
63. Armitage, P.D., Moss, D., Wright, J.F., Furse, M.T. (1983). The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Research*, 17(3), 333–347.
64. Шерстюк, Н.П., Ігнатенко, О.В. (2021). Гідроекологічна характеристика штучних водойм степової зони України. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, серія "Екологія"*, №25.
65. Струк, А.І., Дьяченко, Л.О. (2022). Вплив сільськогосподарського навантаження на екосистеми водойм. *Екологічні науки*, №39, 14–22.
66. European Commission (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy*.
67. Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.

68. Boyd, C.E., Tucker, C.S. (2012). *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Springer.
69. Ковальчук, І.П., Черненко, О.М. (2020). Роль буферних смуг у зниженні забруднення водойм сільськогосподарськими стоками. *Екологічні науки*, №32, 12–18.
70. Chopin, T., Robinson, S. (2004). Defining the appropriate regulatory and policy framework for the development of integrated multi-trophic aquaculture practices. *Canadian Science Advisory Secretariat Research Document*, 2004/102.
71. Мельниченко, М.В., Овчиннікова, Л.В. (2021). Природоорієнтовані рішення для очищення води у малих водоймах. *Гідроекологічний журнал*, 58(3), 41–50.
72. Тарасов, С.М., Бондаренко, І.С. (2022). Екологічна оцінка та модернізація аквакультурних систем в Україні. *Наукові праці Інституту рибного господарства НААН*, №35, 64–71.