**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет лісового господарства та екології

Кафедра екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

**ТКАЧУК ЮЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 574.5:591.5

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

# АКВАРІУМ ЯК МОДЕЛЬНА ЕКОСИСТЕМА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ ГІДРОБІОНТІВ

101 «Екологія»

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Юлія ТКАЧУК

Керівник роботи:
**Дмитро ВИСКУШЕНКО,**
кандидат біол. наук, доцент

**Житомир – 2026**

**Висновок кафедри екології**

за результатами попереднього захисту:
_____

Протокол засідання кафедри екології
№ __ від «___» _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

екології Юрій НИКИТЮК

«___» _____ 2026 р.

**Результати захисту кваліфікаційної роботи**

Здобувач вищої освіти **Юлія Ткачук** захистила кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК _____ _____
(підпис)

## АНОТАЦІЯ

*Ткачук Ю.О.* Акваріум як модельна екосистема для вивчення екологічних взаємодій гідробіонтів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 101 «Екологія». – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У роботі розглянуто теоретичні та прикладні аспекти використання акваріума як модельної екосистеми для дослідження екологічних взаємодій гідробіонтів. Проаналізовано основні типи біотичних взаємозв'язків у водному середовищі. Визначено особливості формування та функціонування штучних водних екосистем у контрольованих умовах.

Досліджено вплив абіотичних факторів (температури, освітлення, хімічного складу води) на стан та поведінку гідробіонтів, а також на стабільність екосистеми в цілому. Проведено оцінку екологічної рівноваги в акваріумі як замкненій системі та встановлено закономірності змін біоценозу під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників.

Обґрунтовано можливість використання акваріумних систем як ефективного інструменту для моделювання екологічних процесів, проведення навчальних і наукових досліджень, а також формування практичних навичок у галузі екології та гідробіології.

Ключові слова: акваріум, модельна екосистема, гідробіонти, екологічні взаємодії, біоценоз, абіотичні фактори, трофічні зв'язки, екологічна рівновага.

## ANNOTATION

*Tkachuk Yu.* Aquarium as a Model Ecosystem for Studying Ecological Interactions of Hydrobionts. – Qualification paper manuscript copyrights.

Qualification work for obtaining a Bachelor's degree in the specialty 101 «Ecology». – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The paper examines theoretical and applied aspects of using an aquarium as

a model ecosystem for studying ecological interactions of hydrobionts. The main types of biotic interactions in aquatic environments are analyzed. The features of formation and functioning of artificial aquatic ecosystems under controlled conditions are determined.

The influence of abiotic factors (temperature, lighting, water chemistry) on the condition and behavior of hydrobionts, as well as on ecosystem stability, is investigated. The ecological balance of the aquarium as a closed system is assessed, and patterns of biocenosis changes under the influence of internal and external factors are identified.

The feasibility of using aquarium systems as an effective tool for modeling ecological processes, conducting educational and scientific research, and developing practical skills in ecology and hydrobiology is substantiated.

Key words: aquarium, model ecosystem, hydrobionts, ecological interactions, biocenosis, abiotic factors, trophic relationships, ecological balance.

# ЗМІСТ

Стор.

**ВСТУП** **6**

**1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ ГІДРОБІОНТІВ** **9**

1.1. Особливості структури та функціонування водних екосистем 9

1.2. Класифікація та характеристика екологічних взаємодій гідробіонтів 11

1.3. Акваріум як штучна модельна екосистема: можливості та обмеження дослідження 14

**2. УМОВИ ФОРМУВАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ АКВАРІУМНОЇ ЕКОСИСТЕМИ** **18**

2.1. Характеристика акваріума як об’єкта дослідження 18

2.2. Абіотичні та біотичні фактори функціонування акваріумної екосистеми 21

2.3. Методи дослідження екологічних взаємодій гідробіонтів в умовах акваріума 24

**3. АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ ГІДРОБІОНТІВ ТА ОЦІНКА СТАБІЛЬНОСТІ АКВАРІУМНОЇ ЕКОСИСТЕМИ** **27**

3.1. Дослідження трофічних і конкурентних взаємодій у модельній екосистемі 27

3.2. Оцінка екологічної рівноваги та факторів стабільності акваріумної системи 30

**ВИСНОВКИ** **33**

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ** **35**

# ВСТУП

Водне середовище вирізняється високою чутливістю до змін умов існування та швидкою реакцією біоти на коливання фізико-хімічних параметрів [4, 12]. Саме тому невеликі за об’ємом штучні водойми, зокрема акваріуми, можуть слугувати зручним інструментом для відтворення та спостереження екологічних процесів у контрольованих умовах. У таких системах відносно легко простежити формування трофічних зв’язків, прояви конкуренції, симбіотичних відносин і реакцію організмів на зміну середовища, що в природних водоймах часто ускладнено через масштабність і багатофакторність впливів.

Зростання інтересу до експериментальних моделей у екології [16] та гідробіології зумовлює необхідність поглибленого осмислення ролі акваріумів як спрощених, але інформативних екосистем. Вони дозволяють не лише візуалізувати екологічні взаємодії гідробіонтів, а й кількісно оцінювати зміни у структурі біоценозу, що має значення як для навчального процесу, так і для прикладних досліджень. Разом із тим питання меж репрезентативності таких моделей [8], їх стабільності та адекватності відображення природних процесів залишаються недостатньо систематизованими. Це визначає актуальність обраної теми.

**Мета роботи** полягає у дослідженні акваріума як модельної екосистеми та визначенні особливостей екологічних взаємодій гідробіонтів у контрольованих умовах.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі **завдання**:

- проаналізувати специфіку структури та функціонування водних екосистем;
- узагальнити основні типи екологічних взаємодій гідробіонтів;
- охарактеризувати акваріум як штучну екосистему та оцінити його дослідницький потенціал;
- визначити роль абіотичних і біотичних факторів у формуванні акваріумного біоценозу;

- дослідити трофічні та конкурентні взаємодії в умовах модельної системи;
- оцінити екологічну рівновагу та чинники стабільності акваріумної екосистеми.

**Об'єктом дослідження** є акваріум як штучно створена водна екосистема.

**Предметом дослідження** виступають екологічні взаємодії гідробіонтів та закономірності функціонування біоценозу в умовах обмеженого водного середовища.

У процесі виконання роботи застосовано комплекс **методів дослідження**, зокрема: аналіз і узагальнення наукових джерел, спостереження за станом і поведінкою гідробіонтів, порівняльний аналіз змін екологічних показників, елементи експериментального моделювання умов середовища, а також системний підхід до оцінки структури та функціонування екосистеми.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження.**

**Ткачук Ю.О.** Методичні підходи до вивчення гідробіонтів у контрольованих акваріумних умовах. Виклики сьогодення та наслідки Чорнобильської катастрофи. Екологія. Наука. Практика-2026 : матеріали XXII Всеукр. наук.-практ. конф. Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 75-77 [17].

Яремчук С.М., Вік С.В., Кулаківська В.М., **Ткачук Ю.О.** Акваріумні моделі в системі цифрового екомоніторингу міських екосистем. 4th International Scientific and Practical Conference. Innovative Research in Science and Economy. Brussels: International Scientific Unity, 2026. p. 72-74 [22].

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у можливості використання акваріумних систем як наочного та керованого інструменту для вивчення екологічних процесів, формування практичних навичок у студентів екологічних спеціальностей, а також апробації окремих підходів до моделювання біотичних взаємодій. Отримані результати можуть бути

застосовані у навчальному процесі, під час проведення лабораторних і практичних занять, а також у подальших дослідженнях у галузі гідроекології та біоіндикації.

**Структура та обсяг роботи.** Робота викладена на 39 сторінках комп'ютерного тексту, кількість таблиць – 6, кількість рисунків – 8. Список використаної літератури – 40 джерел.

# РОЗДІЛ 1
# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ ГІДРОБІОНТІВ

## 1.1. Особливості структури та функціонування водних екосистем

Водні екосистеми формуються в умовах середовища, де ключовим регулятором усіх процесів виступає вода як фізичний, хімічний і біологічний фактор. На відміну від наземних систем, тут визначальне значення мають розчинені речовини, щільність середовища та його теплоємність, що безпосередньо впливає на перебіг біологічних процесів і просторову організацію угруповань організмів.

Структурно водні екосистеми характеризуються чіткою диференціацією за вертикаллю та горизонталлю [36]. У вертикальному напрямку виділяються шари, які відрізняються за освітленістю, температурою та вмістом кисню. Верхні горизонти, де доступне світло, забезпечують фотосинтетичну активність фітопланктону та вищих водних рослин. Глибші шари, навпаки, залежать переважно від надходження органічної речовини з верхніх рівнів і характеризуються зниженими показниками продукційних процесів. Така стратифікація визначає розподіл гідробіонтів і формування екологічних ніш.

Горизонтальна структура водних екосистем також є неоднорідною. Прибережні зони зазвичай відзначаються більшою біорізноманітністю та продуктивністю порівняно з відкритими ділянками, що пояснюється наявністю субстрату, кращими умовами освітлення та інтенсивнішим обміном речовин. У межах навіть невеликої водойми можуть формуватися мікробіотопи з різними екологічними умовами, що сприяє співіснуванню видів із різними вимогами до середовища.

Функціонування водних екосистем базується на безперервному обміні речовини та енергії між біотичними і абіотичними компонентами. Первинна

продукція формується завдяки діяльності автотрофних організмів, які використовують світлову енергію для синтезу органічних сполук. Ця продукція є основою для існування консументів різних рівнів, включаючи безхребетних і риб. Завершальною ланкою виступають редуценти, які забезпечують мінералізацію органічних решток і повернення поживних елементів у середовище (рис. 1.1.1).




Рис. 1.1.1. Узагальнена структура водної екосистеми.

Особливістю водних систем є значна роль мікроорганізмів у трансформації речовин. Бактерії та інші мікробні компоненти забезпечують розклад органіки, регулюють концентрацію розчинених газів і беруть участь у біогеохімічних циклах. У замкнених або напівзамкнених системах їхня активність може визначати стабільність екосистеми в цілому.

Важливим аспектом функціонування є залежність біоти від фізико-хімічних параметрів води [26]. Температурний режим впливає на швидкість метаболічних процесів, розчинність газів і поведінку організмів. Вміст розчиненого кисню визначає можливості існування аеробних видів, тоді як коливання кислотності та мінералізації можуть змінювати видовий склад

угруповань. Навіть незначні зміни цих показників здатні спричиняти перебудову всієї системи [5, 39].

Водні екосистеми також характеризуються відносною динамічністю. Їхній стан змінюється під впливом сезонних коливань, зовнішніх надходжень речовин і внутрішніх процесів, таких як накопичення органіки чи зміна чисельності окремих видів. При цьому стабільність системи визначається здатністю підтримувати функціональні зв'язки між компонентами та протидіяти дестабілізуючим чинникам.

У штучних водних системах, зокрема акваріумах, зазначені закономірності проявляються у спрощеному вигляді [33]. Обмежений об'єм води, контрольовані умови та зменшене різноманіття організмів дозволяють більш чітко простежити основні екологічні процеси. Водночас такі системи є більш чутливими до порушень рівноваги, що робить їх зручними моделями для дослідження взаємозв'язків між компонентами екосистеми.

Отже, водні екосистеми являють собою складно організовані структури, де фізико-хімічні властивості середовища тісно пов'язані з біологічними процесами. Їхня специфіка полягає у вертикальній та горизонтальній неоднорідності, активній участі мікроорганізмів у кругообігу речовин і високій чутливості до змін умов середовища, що визначає особливості функціонування та розвитку таких систем.

## 1.2. Класифікація та характеристика екологічних взаємодій гідробіонтів

Екологічні взаємодії у водних екосистемах формують основу їх функціонування, визначаючи структуру біоценозів, розподіл видів і напрямки потоків речовини та енергії. У водному середовищі такі взаємодії набувають специфічних рис, що зумовлено високою рухливістю середовища, дифузією речовин і тісним контактом організмів з водною масою. Це

створює умови для швидкого обміну ресурсами, сигналами та продуктами життєдіяльності [35].

Одним із базових підходів до класифікації екологічних взаємодій є їх поділ за характером впливу організмів один на одного [11]. У цьому контексті виділяють позитивні, негативні та нейтральні взаємозв'язки. До позитивних належать форми співіснування, за яких хоча б один з учасників отримує користь без шкоди для іншого або з взаємною вигодою [26]. Найбільш типовими серед них є мутуалізм і коменсалізм. У водних екосистемах мутуалістичні відносини можуть проявлятися, наприклад, у взаємодії між деякими безхребетними та мікроорганізмами, що забезпечують обмін поживними речовинами. Коменсалізм часто спостерігається у формі використання одного організму як субстрату або укриття іншим (табл. 1.2.1).

Таблиця 1.2.1

Основні типи екологічних взаємодій гідробіонтів

| **Тип взаємодії** | **Позначення** | **Суть взаємодії** | **Приклад у водній екосистемі** |
|---|---|---|---|
| **Мутуалізм** | (+/+) | Обидва види отримують користь | Симбіоз водоростей і бактерій |
| **Коменсалізм** | (+/0) | Один має користь, інший без змін | Риби, що використовують рослини як укриття |
| **Конкуренція** | (–/–) | Обмеження ресурсів | Риби за корм |
| **Хижацтво** | (+/–) | Один поїдає іншого | Щука – дрібна риба |
| **Паразитизм** | (+/–) | Живлення за рахунок хазяїна | Паразити риб |
| **Детритофагія** | (+) | Використання органічних решток | Донні безхребетні |

Негативні взаємодії пов'язані з обмеженням доступу до ресурсів або прямим споживанням одного організму іншим. Найбільш поширеними є конкуренція та хижацтво. Конкуренція виникає тоді, коли кілька видів або особин претендують на обмежені ресурси, такі як їжа, простір або кисень. У водному середовищі вона може проявлятися як між різними видами, так і в

межах одного виду. Особливістю конкуренції у воді є її опосередкований характер, оскільки ресурси часто розподілені нерівномірно у просторі.

Хижацтво є ще одним ключовим типом взаємодії, що визначає динаміку популяцій. У водних екосистемах воно охоплює широкий спектр зв’язків: від споживання мікроскопічного планктону до складних трофічних відносин між рибами різних рівнів. Хижаки виконують регуляторну функцію, стримуючи надмірне зростання чисельності окремих видів і тим самим підтримуючи структурну рівновагу системи.

Окрему групу становлять взаємодії, пов’язані з паразитизмом. У водному середовищі паразитичні організми широко представлені серед найпростіших, червів і деяких ракоподібних. Вони використовують своїх господарів як джерело живлення та середовище існування, що може призводити до змін у фізіологічному стані або поведінці останніх. Паразитизм відіграє важливу роль у регуляції чисельності популяцій і може впливати на трофічні зв’язки.

Значну роль у функціонуванні водних екосистем відіграють детритні зв’язки. Вони формуються у процесі розкладу органічної речовини, коли залишки рослин і тварин стають джерелом живлення для детритофагів і мікроорганізмів. Такі взаємодії забезпечують повернення поживних елементів у доступну форму та підтримують безперервність кругообігу речовин [30]. У водному середовищі цей процес має особливе значення через швидке накопичення органіки та активність мікробних угруповань.

Іншим важливим аспектом є просторові взаємодії, які пов’язані з використанням середовища як місця існування. Багато гідробіонтів залежать від наявності субстрату для прикріплення, укриття або розмноження. Це призводить до формування складних мереж взаємозв’язків, де одні організми створюють умови для існування інших. Наприклад, водні рослини можуть виступати як середовище для розвитку безхребетних і мальків риб. Варто також враховувати, що екологічні взаємодії рідко існують ізольовано. У реальних умовах вони поєднуються, формуючи складні мережі зв’язків, які

змінюються у часі. Один і той самий вид може одночасно брати участь у кількох типах взаємодій, виконуючи різні функції в екосистемі. Це забезпечує гнучкість і адаптивність системи до змін середовища.

Таким чином, екологічні взаємодії гідробіонтів охоплюють широкий спектр зв'язків – від взаємовигідних до антагоністичних. Їхня сукупність формує структуру біоценозу, визначає потоки енергії та забезпечує стійкість водних екосистем. Розуміння цих взаємодій є необхідною передумовою для дослідження функціонування як природних, так і модельних водних систем.

### 1.3. Акваріум як штучна модельна екосистема: можливості та обмеження дослідження

Акваріумні системи розглядаються як зручні експериментальні моделі для аналізу процесів, що відбуваються у водному середовищі. Їхня цінність полягає у поєднанні керованості умов із наочністю біологічних реакцій. На відміну від природних водойм, де вплив численних факторів часто ускладнює інтерпретацію результатів, у межах акваріума дослідник має можливість варіювати окремі параметри та фіксувати відповідь біоти (рис. 1.3.1).

Однією з ключових переваг акваріума як модельної екосистеми є контроль над абіотичними характеристиками [27, 29]. Температурний режим, освітлення, аерація (рис. 1.3.2), концентрація розчинених речовин (рис. 1.3.3) можуть підтримуватися на заданому рівні або змінюватися за експериментальною схемою [31]. Це дозволяє відтворювати різні сценарії середовища та оцінювати їхній вплив на організми [34]. Крім того, компактність системи забезпечує можливість постійного спостереження, що особливо важливо при дослідженні поведінкових реакцій та короткочасних змін [24]. Ще однією суттєвою перевагою є спрощена структура біоценозу. Обмежена кількість видів дає змогу чіткіше простежити взаємозв'язки між ними, зокрема трофічні, конкурентні та симбіотичні [40]. У таких умовах

легше виявити причинно-наслідкові зв’язки, які у природних екосистемах часто маскуються складністю взаємодій [25]. Це робить акваріум ефективним інструментом як для наукових досліджень, так і для освітніх цілей.



Рис. 1.3.1. Дослідницький акваріум.

Важливою характеристикою акваріумних систем є можливість моделювання різних типів екологічних ситуацій. Зміна щільності популяцій, введення нових видів або варіювання умов середовища дозволяють відтворювати процеси, пов’язані з динамікою біоценозу. Такі підходи застосовуються для дослідження адаптаційних реакцій, оцінки стійкості системи та аналізу факторів, що впливають на її функціонування [32].

Разом із тим акваріум як модель має низку обмежень, які необхідно враховувати при інтерпретації результатів. Насамперед це стосується масштабу системи. Невеликий об’єм води та обмежений простір змінюють характер взаємодій між організмами, посилюючи роль випадкових факторів і локальних процесів. У таких умовах навіть незначні зміни можуть призводити до швидких і різко виражених наслідків, що не завжди відповідає природним сценаріям. Ще одним обмеженням є спрощення видового складу. Відсутність багатьох функціональних груп організмів знижує складність екосистеми та може впливати на перебіг біогеохімічних процесів. Наприклад,

редукція мікробного різноманіття або відсутність окремих трофічних рівнів змінює швидкість розкладу органічної речовини та кругообіг елементів. Це означає, що результати, отримані в акваріумі, не завжди можуть бути безпосередньо перенесені на природні водойми без відповідних коригувань.




Рис. 1.3.2. Прилади для контролю основних параметрів водного середовища

Суттєвим фактором є також залежність системи від зовнішнього втручання. На відміну від природних екосистем, акваріум потребує регулярного обслуговування: очищення, заміни води, контролю параметрів. Це створює додатковий антропогенний вплив, який може змінювати хід досліджуваних процесів. У деяких випадках важко відокремити природні реакції системи від ефектів, спричинених діями дослідника. Не менш важливим є питання репрезентативності. Акваріумна модель відтворює лише окремі аспекти функціонування водних екосистем, тому її результати мають

розглядатися як спрощене відображення реальних процесів. Вона дозволяє виявити загальні закономірності, але не враховує повною мірою вплив просторових масштабів, гідрологічних режимів і довготривалих екологічних змін.




Рис. 1.3.3. Тестери водного середовища

Таблиця 1.3.1

Порівняльна характеристика можливостей і обмежень акваріума як модельної екосистеми

| **Критерій** | **Можливості** | **Обмеження** |
|---|---|---|
| **Контроль умов** | Повний контроль параметрів | Штучність середовища |
| **Спостереження** | Висока наочність | Обмежений масштаб |
| **Біорізноманіття** | Керований склад | Спрощений біоценоз |
| **Експеримент** | Можливість моделювання | Обмежена репрезентативність |
| **Стабільність** | Швидка реакція системи | Нестійкість до змін |

Попри зазначені обмеження, акваріум залишається ефективним інструментом дослідження, якщо його застосування супроводжується коректною постановкою експерименту та критичним аналізом отриманих даних [23]. Основні можливості та обмеження використання акваріума як модельної екосистеми узагальнено в таблиці (табл. 1.3.1). Поєднання контрольованих умов і можливості прямого спостереження робить його придатним для вивчення окремих механізмів взаємодії організмів і реакцій системи на зміни середовища.

# РОЗДІЛ 2
# УМОВИ ФОРМУВАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ АКВАРІУМНОЇ ЕКОСИСТЕМИ

## 2.1. Характеристика акваріума як об’єкта дослідження

У межах виконання кваліфікаційної роботи акваріум розглядається як експериментальна система з керованими параметрами, що дозволяє відтворювати окремі елементи функціонування водного середовища в обмеженому просторі [1]. Його використання як об’єкта дослідження зумовлене можливістю поєднання спостереження за живими організмами з регулюванням умов їх існування, що є важливим для встановлення причинно-наслідкових зв’язків між факторами середовища та реакцією біоти [28].

Досліджуваний акваріум являє собою напівзамкнену систему, в якій відбувається постійний обмін речовин між компонентами за умови обмеженого зовнішнього впливу [18]. Його конструктивні характеристики включають об’єм резервуара, матеріал стінок, тип ґрунтового субстрату, а також наявність технічного обладнання (рис. 2.1.1). Об’єм акваріума є одним із визначальних параметрів, оскільки він впливає на стабільність середовища, швидкість зміни показників та інтенсивність взаємодій між організмами. Менші об’єми характеризуються більшою варіабельністю параметрів, тоді як більші системи відзначаються відносною інерційністю.

Структурно акваріум складається з біотичних та абіотичних компонентів, взаємодія яких формує його функціональні властивості. До абіотичних складових належать вода як основне середовище, субстрат, освітлення та температурний режим. Важливу роль відіграють фізико-хімічні характеристики води, зокрема кислотність, жорсткість та вміст розчинених газів [19]. Ці показники визначають умови існування гідробіонтів і можуть змінюватися під впливом як природних процесів, так і технічного втручання.

Біотична складова акваріума представлена різними групами організмів, серед яких виділяються автотрофні та гетеротрофні компоненти [2]. Рослини виконують функції первинного синтезу органічної речовини та беруть участь у газообміні, тоді як тварини формують різні рівні трофічної структури. Значну роль відіграють мікроорганізми, які забезпечують трансформацію речовин і підтримують хімічну рівновагу середовища. Їхня діяльність особливо важлива у процесах розкладу органічних решток і перетворення азотовмісних сполук.




Рис. 2.1.1. Схема будови акваріума з основними структурними та функціональними компонентами.

Особливістю акваріума як об’єкта дослідження є наявність технічних систем, що забезпечують підтримання необхідних умов. До них належать фільтраційні установки, аераційні пристрої та освітлювальне обладнання. Фільтрація виконує функцію очищення води від механічних і розчинених домішок, а також створює умови для розвитку корисної мікрофлори. Аерація сприяє насиченню води киснем і покращує умови існування організмів, тоді як освітлення впливає на інтенсивність фотосинтетичних процесів і

біоритми. Важливим аспектом є режим функціонування акваріума, який визначається сукупністю умов утримання та обслуговування. До таких умов належать регулярність підміни води, режим годування організмів, контроль параметрів середовища та профілактика забруднення. Від стабільності цих процесів залежить загальний стан системи та можливість отримання достовірних результатів дослідження.

Акваріум як об’єкт дослідження також характеризується високою чутливістю до змін умов. Невеликі відхилення у параметрах можуть швидко відображатися на стані організмів і структурі угруповань. Це дозволяє фіксувати навіть незначні зміни, однак водночас потребує точного контролю та обережності при проведенні експериментів.

З методичної точки зору важливою є можливість стандартизації умов дослідження. Використання акваріума дає змогу повторювати експериментальні серії, змінюючи окремі фактори та порівнюючи результати. Це підвищує відтворюваність досліджень і дозволяє отримувати більш обґрунтовані висновки.

Таблиця 2.1.1

Основні характеристики акваріума як експериментальної системи

| **Параметр** | **Характеристика** | **Значення для дослідження** |
|---|---|---|
| **Об’єм** | Малий / середній / великий | Визначає стабільність |
| **Склад біоти** | Обмежений | Спрощує аналіз взаємодій |
| **Контроль умов** | Високий | Можливість експерименту |
| **Час реакції** | Швидкий | Фіксація змін |
| **Зовнішній вплив** | Регульований | Контроль результатів |

Таким чином, акваріум як об’єкт дослідження являє собою керовану водну систему з чітко визначеними структурними компонентами та функціональними зв’язками (табл. 2.1.1). Його особливості полягають у поєднанні контрольованості умов, можливості безперервного спостереження та відносної простоти організації експерименту [15]. Це робить акваріум ефективним інструментом для дослідження екологічних процесів у водному

середовищі за умови врахування його специфіки та обмежень.

## 2.2. Абіотичні та біотичні фактори функціонування акваріумної екосистеми

Функціонування акваріумної екосистеми визначається сукупною дією умов неживої природи та взаємодіями організмів, які її населяють. На відміну від природних водойм, де параметри середовища формуються під впливом великої кількості зовнішніх чинників, в акваріумі значна частина процесів є керованою (табл. 2.2.1). Це дозволяє цілеспрямовано змінювати умови існування гідробіонтів і відстежувати їхню реакцію.

Таблиця 2.2.1

Основні абіотичні та біотичні фактори акваріумної екосистеми

| **Тип фактору** | **Фактор** | **Вплив на систему** |
|---|---|---|
| Абіотичний | Температура | Визначає швидкість метаболізму |
| Абіотичний | Освітлення | Впливає на фотосинтез |
| Абіотичний | Кисень | Забезпечує дихання |
| Абіотичний | pH | Впливає на хімічні процеси |
| Біотичний | Рослини | Продукція органічної речовини |
| Біотичний | Риби | Споживання ресурсів |
| Біотичний | Мікроорганізми | Розклад органіки |

До абіотичних факторів належать фізичні та хімічні характеристики водного середовища, які безпосередньо впливають на життєдіяльність організмів. Одним із ключових параметрів є температура, що визначає швидкість обмінних процесів, активність гідробіонтів і перебіг біохімічних реакцій. Навіть незначні коливання температури можуть призводити до зміни поведінки організмів або порушення їх фізіологічного стану. Важливе значення має освітлення, яке впливає на фотосинтетичну активність водних рослин і водоростей, а також на добові ритми мешканців акваріума. Інтенсивність і тривалість світлового режиму визначають рівень первинної продукції та опосередковано впливають на інші компоненти системи.

Недостатнє або надмірне освітлення може змінювати співвідношення між різними групами організмів.

Суттєвим чинником є газовий режим води, насамперед вміст розчиненого кисню. Його концентрація залежить від аерації, температури та інтенсивності біологічних процесів. Кисень необхідний для дихання більшості гідробіонтів, а його дефіцит може призводити до пригнічення життєвих функцій або загибелі організмів. Водночас вміст вуглекислого газу впливає на кислотність середовища та використовується рослинами у процесі фотосинтезу.

До хімічних параметрів води належать показники кислотності (pH), жорсткості та концентрації розчинених речовин. Ці характеристики визначають придатність середовища для різних видів організмів і можуть змінюватися внаслідок біологічної активності або технічного обслуговування акваріума. Особливе значення має вміст азотовмісних сполук, які утворюються в результаті життєдіяльності організмів і підлягають подальшому перетворенню мікроорганізмами.

Не менш важливим є субстрат, який виконує функції механічної опори для рослин, середовища існування для мікроорганізмів і резервуара для накопичення органічних речовин. Його склад і структура впливають на перебіг біохімічних процесів і розподіл організмів у системі.

Біотичні фактори представлені сукупністю живих організмів, що формують біоценоз акваріума. Вони включають різні групи гідробіонтів, які виконують специфічні функції у системі. Рослини та водорості забезпечують синтез органічної речовини і беруть участь у газообміні. Тваринні організми, зокрема риби та безхребетні, виступають споживачами і формують різні рівні трофічної структури. Особливу роль тут відіграють мікроорганізми, які забезпечують трансформацію речовин і підтримання хімічної стабільності середовища. Вони беруть участь у процесах розкладу органічних решток і перетворення азотовмісних сполук, що є необхідним для запобігання накопиченню токсичних речовин. Їх діяльність часто є малопомітною, але

має вирішальне значення для функціонування всієї системи.

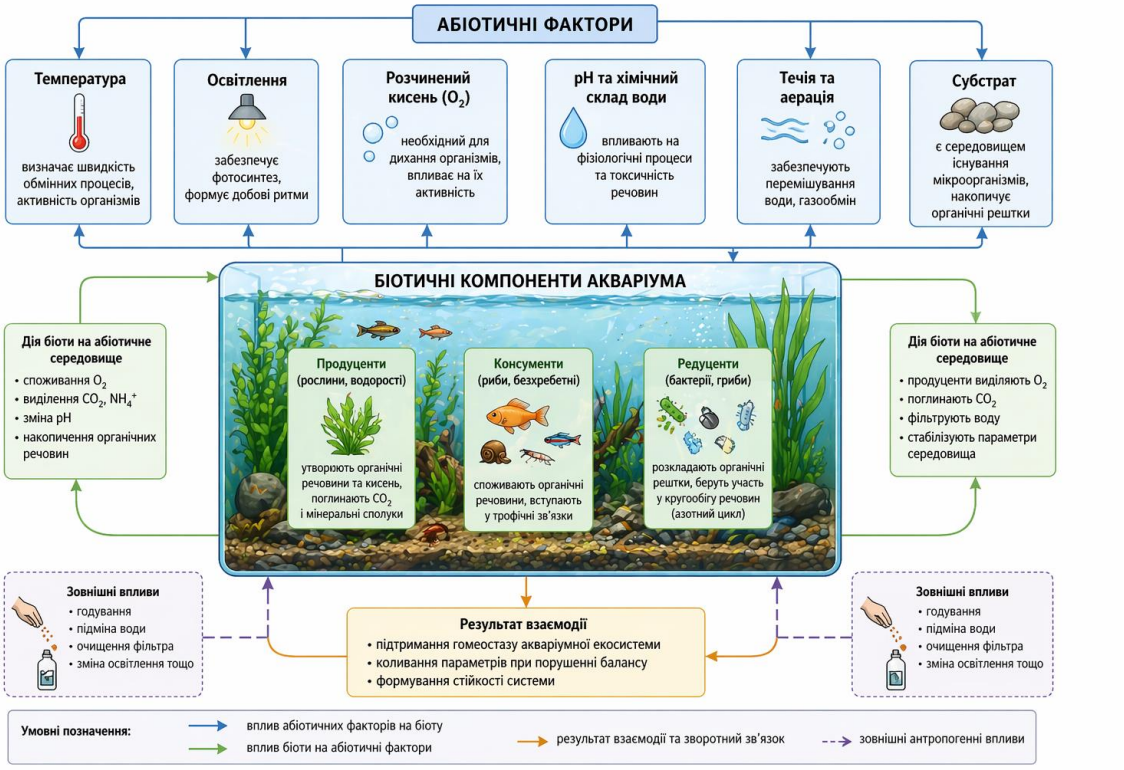


Рис. 2.2.1. Схема взаємодії абіотичних і біотичних факторів у акваріумі

Взаємодії між організмами формують складну мережу зв'язків, що визначає структуру біоценозу. Трофічні відносини, конкуренція за ресурси та інші форми взаємодії впливають на чисельність і розподіл видів. У межах акваріума ці процеси відбуваються у більш стиснених умовах, що робить їх більш помітними та доступними для дослідження.

Функціонування акваріумної екосистеми є результатом постійної взаємодії абіотичних і біотичних факторів (рис. 2.2.1). Зміни у фізико-хімічних параметрах води можуть спричиняти перебудову біоценозу, тоді як діяльність організмів, у свою чергу, впливає на стан середовища. Такий взаємозв'язок забезпечує динамічний характер системи та визначає її стійкість. В той же час ефективне функціонування акваріума залежить від збалансованого поєднання умов середовища та складу біоти. Розуміння ролі абіотичних і біотичних факторів є необхідною передумовою для проведення досліджень і підтримання стабільності модельної екосистеми.

## 2.3. Методи дослідження екологічних взаємодій гідробіонтів в умовах акваріума

Вивчення екологічних взаємодій у межах акваріумної системи потребує поєднання спостережних і експериментальних підходів, що дозволяють фіксувати як безпосередні контакти між організмами, так і опосередковані ефекти через зміну параметрів середовища [6]. Компактність та керованість умов створюють можливість для детального аналізу процесів, які у природних водоймах важко ізолювати або відтворити.

Одним із базових методів є систематичне спостереження за поведінкою гідробіонтів. Воно здійснюється шляхом візуальної фіксації змін у руховій активності, харчових реакціях, просторовому розподілі організмів та їх взаємодії між собою. Для підвищення точності використовують щоденники спостережень або відеофіксацію, що дозволяє багаторазово аналізувати отримані дані та уникати суб’єктивних оцінок. Такий підхід є особливо ефективним при дослідженні трофічних зв’язків, конкуренції та поведінкових реакцій.

Важливе місце займає експериментальний метод, який передбачає цілеспрямовану зміну окремих факторів із подальшим аналізом відповіді системи (рис 2.3.1). Зокрема, можуть варіюватися умови освітлення, температури, щільність популяцій або склад біоценозу. Це дозволяє встановлювати причинно-наслідкові залежності між змінами середовища та реакцією гідробіонтів. Проведення таких експериментів вимагає чіткого планування, визначення контрольних і дослідних варіантів, а також повторюваності для підвищення достовірності результатів.

Для оцінки інтенсивності взаємодій застосовується кількісний аналіз, який включає облік чисельності організмів, визначення частоти їх контактів, швидкості споживання корму та інших показників. Отримані дані можуть бути представлені у вигляді таблиць, графіків або діаграм, що полегшує їх інтерпретацію. Кількісний підхід дозволяє не лише описати явища, але й

порівнювати різні умови функціонування системи.

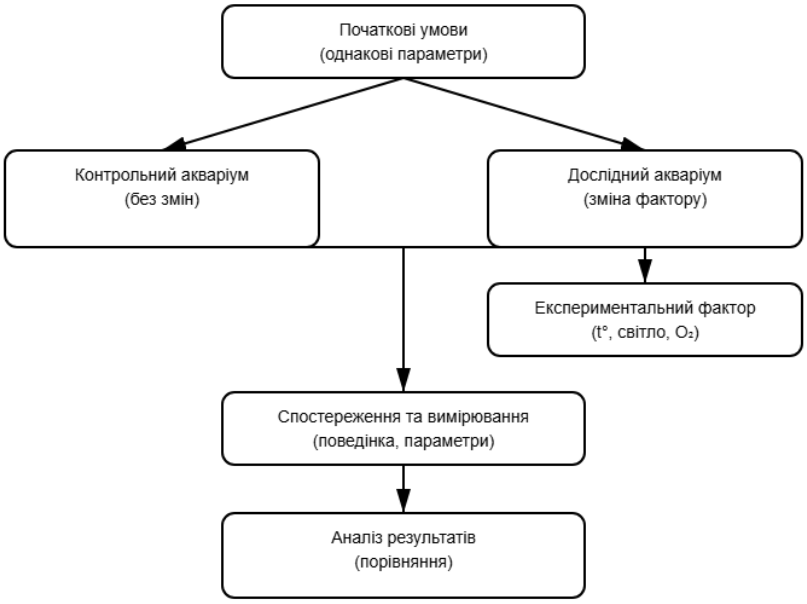


Рис. 2.3.1. Схема організації експерименту

Окрему групу становлять методи дослідження фізико-хімічних параметрів води, які забезпечують розуміння умов, у яких відбуваються біологічні процеси. Вимірювання температури, кислотності, вмісту розчиненого кисню та інших показників здійснюється за допомогою відповідних приладів [37, 38]. Регулярний контроль цих параметрів дозволяє встановлювати зв’язок між змінами середовища та поведінкою організмів, а також своєчасно виявляти відхилення від оптимальних умов [37].

Для вивчення ролі мікроорганізмів у системі застосовуються методи непрямої оцінки, зокрема аналіз динаміки концентрації азотовмісних сполук або швидкості розкладу органічної речовини. Хоча безпосереднє спостереження за мікробіотою є обмеженим, такі підходи дозволяють оцінити її вплив на функціонування екосистеми.

Порівняльний метод використовується для зіставлення результатів, отриманих у різних умовах або на різних етапах дослідження. Це дає змогу визначити, які фактори мають найбільший вплив на формування взаємодій між гідробіонтами. Порівняння може здійснюватися як між різними варіантами експерименту, так і в межах одного акваріума в різні періоди

часу.

Узагальнену характеристику застосованих методів дослідження наведено в таблиці 2.3.1.

Таблиця 2.3.1

Основні методи дослідження екологічних взаємодій гідробіонтів

| **Метод** | **Суть** | **Що дозволяє визначити** |
|---|---|---|
| **Спостереження** | Візуальна фіксація | Поведінка, взаємодії |
| **Експеримент** | Зміна умов | Причинно-наслідкові зв’язки |
| **Вимірювання** | Контроль параметрів | Стан середовища |
| **Кількісний аналіз** | Обробка даних | Інтенсивність процесів |
| **Порівняння** | Зіставлення результатів | Вплив факторів |

Системний підхід дозволяє розглядати акваріум як єдине ціле, де всі компоненти взаємопов’язані. Застосування цього підходу передбачає аналіз не окремих елементів, а їх взаємодії та впливу на загальний стан системи. Це особливо важливо при дослідженні складних процесів, таких як стабілізація екосистеми або її реакція на зовнішні впливи.

У процесі дослідження важливу роль відіграє дотримання методичних вимог, зокрема стабільність умов, регулярність вимірювань та точність фіксації даних. Це забезпечує відтворюваність результатів і дозволяє уникнути помилок, пов’язаних із випадковими змінами параметрів.

# РОЗДІЛ 3
# АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ ГІДРОБІОНТІВ ТА ОЦІНКА СТАБІЛЬНОСТІ АКВАРІУМНОЇ ЕКОСИСТЕМИ

## 3.1. Дослідження трофічних і конкурентних взаємодій у модельній екосистемі

Дослідження трофічних і конкурентних взаємодій проводилося у модельній акваріумній екосистемі протягом 60 діб. До складу біоценозу входили: гуппі (*Poecilia reticulata*), неон червоний (*Paracheirodon axelrodi*), перлинний гурамі (*Trichopodus leerii*), анциструс (*Ancistrus sp.*), хелена (*Anentome helena*), креветка неокаридина (*Neocaridina heteropoda*) та водна рослина – валіснерія спіральна (*Vallisneria spiralis*). Такий підбір гідробіонтів дозволив простежити взаємодії між організмами різних трофічних рівнів і екологічних ніш [20].

Спостереження здійснювалися щоденно у два періоди: перед внесенням корму та впродовж 20 хв після годування [3, 10]. Встановлено, що найбільш інтенсивна харчова активність спостерігалася в перші 5–10 хвилин після внесення корму. У цей період гуппі та неони активно переміщувалися у верхніх і середніх шарах води, утворюючи тимчасові скупчення в зоні подачі корму.

Аналіз трофічних взаємодій показав, що основними консументами у системі виступали гуппі (*Poecilia reticulata*) та неон червоний (*Paracheirodon axelrodi*), які використовували внесений корм. Перлинний гурамі (*Trichopodus leerii*) займав проміжне положення, споживаючи як корм, так і частково органічні частки, що знаходилися у товщі води. Донний рівень трофічної структури був представлений анциструсом (*Ancistrus sp.*), який активно споживав органічні залишки та обростання на поверхнях.

Особливий інтерес становила участь хелени (*Anentome helena*) у трофічних процесах. У ході спостережень зафіксовано її переміщення у

придонній зоні та періодичні спроби взаємодії з неокаридиною, що підтверджує її роль як хижака в системі. Хоча пряме полювання у межах дослідження ми не помітили, однак присутність цього виду впливала на загальну поведінкову активність донних організмів.

Валіснерія спіральна (*Vallisneria spiralis*) виконувала функцію продуцента та одночасно створювала просторову структуру середовища [21]. Вона формувала ділянки укриття, що впливало на розподіл риб у межах акваріума. Було відмічено, що у густіших заростях знижувалася інтенсивність контактів між особинами, що опосередковано впливало на рівень конкуренції.

Конкурентні взаємодії проявлялися переважно під час годування [14]. У гуппі (*Poecilia reticulata*) спостерігалося випереджальне захоплення кормових частинок, що призводило до нерівномірного їх розподілу. Окремі особини демонстрували активніші харчові реакції, що дозволяло їм отримувати більшу частку ресурсів. У неонів (*Paracheirodon axelrodi*) конкуренція мала менш виражений характер і проявлялася у формі групового переміщення без явної агресії.

Перлинний гурамі (*Trichopodus leerii*) у деяких випадках проявляв елементи територіальної поведінки, особливо у зоні укриттів. Це проявлялося у короткочасному витісненні інших риб із зайнятої ділянки. Такі взаємодії були нерегулярними, однак свідчать про формування просторової конкуренції.

Анциструс (*Ancistrus sp.*) практично не вступав у прямі конкурентні контакти з іншими видами, що пояснюється його донним способом життя та відмінною кормовою спеціалізацією. Це свідчить про часткове розмежування екологічних ніш у межах системи.

Динаміка взаємодій змінювалася залежно від умов забезпечення кормом. При достатній кількості кормових ресурсів конкуренція знижувалася, а поведінка організмів набувала більш рівномірного характеру.

У випадках обмеження корму спостерігалося посилення активності гуппі та збільшення частоти контактів між особинами.

Для узагальнення отриманих результатів трофічні рівні та характер взаємодій гідробіонтів у модельній екосистемі наведено в таблиці 3.1.1.

Таблиця 3.1.1

Трофічні рівні та характер взаємодій гідробіонтів у модельній акваріумній екосистемі

| **Вид (укр./лат.)** | **Трофічний рівень** | **Тип живлення** | **Основні взаємодії** | **Конкуренція** |
|---|---|---|---|---|
| **Гуппі (*Poecilia reticulata*)** | Консумент I порядку | Всеїдний | Споживання корму, участь у поверхневому живленні | Внутрішньовидова (за корм) |
| **Неон червоний (*Paracheirodon axelrodi*)** | Консумент I порядку | Всеїдний | Групове живлення у товщі води | Слабка міжвидова |
| **Гурамі перлинний (*Trichopodus leerii*)** | Консумент I порядку | Всеїдний | Споживання корму, територіальна поведінка | Просторова конкуренція |
| **Анциструс (*Ancistrus sp.*)** | Консумент I порядку | Детритофаг | Споживання органічних залишків і обростань | Слабка (з креветками) |
| **Хелена (*Anentome helena*)** | Консумент II порядку | Хижак | Споживання молюсків, вплив на донну фауну | Мінімальна |
| **Неокаридина гетеропода (*Neocaridina heteropoda*)** | Консумент I порядку | Детритофаг | Очищення субстрату, участь у кругообігу речовин | З анциструсом (частково) |
| **Валіснерія спіральна (*Vallisneria spiralis*)** | Продуцент | Автотроф | Фотосинтез, формування середовища | Відсутня |

### 3.2. Оцінка екологічної рівноваги та факторів стабільності акваріумної системи

Стан акваріумної екосистеми після формування трофічних і конкурентних зв’язків оцінювався з позицій здатності системи зберігати відносну сталість параметрів і структури біоценозу за відсутності різких зовнішніх впливів. Аналіз проводився протягом того ж періоду спостережень (60 діб) із урахуванням динаміки поведінки гідробіонтів, розподілу ресурсів та змін фізико-хімічних характеристик води.

Встановлено, що система демонструвала ознаки відносної екологічної рівноваги вже на 4–5 добу після початку спостережень. Це проявлялося у стабілізації поведінкових реакцій риб, зниженні інтенсивності конкурентних взаємодій та більш рівномірному використанні кормових ресурсів. Якщо на початковому етапі фіксувалися локальні скупчення особин і короткочасні конфлікти під час годування, то в подальшому спостерігалося більш упорядковане розподілення гідробіонтів у межах акваріума.

Одним із показників стабілізації системи була зміна характеру трофічних процесів. Залишки корму, що на початку експерименту накопичувалися у придонній зоні, надалі швидше утилізувалися за участю анциструса (*Ancistrus sp.*) та неокаридини гетероподи (*Neocaridina heteropoda*). Це сприяло зменшенню органічного навантаження на систему та підтриманню відносної прозорості води [7]. Водночас присутність хелени (*Anentome helena*) створювала додатковий регуляторний елемент у донному середовищі, хоча її вплив залишався обмеженим через невелику чисельність потенційної здобичі.

Фактором, що позитивно впливав на стабільність системи, стала наявність валіснерії спіральної (*Vallisneria spiralis*). Рослини виконували не лише продуцентну функцію, але й формували мікропросторову структуру середовища. Їх зарості створювали ділянки зниженої активності, що дозволяло зменшити частоту прямих контактів між рибами, зокрема у

періоди після годування. Це опосередковано сприяло зниженню конкурентного тиску.

Оцінка поведінки різних видів показала, що стабільність системи значною мірою визначається їх екологічною сумісністю [13]. Гуппі (*Poecilia reticulata*) та неон червоний (*Paracheirodon axelrodi*) характеризувалися відносно мирною поведінкою та не створювали суттєвого тиску на інших мешканців. Перлинний гурамі (*Trichopodus leerii*) інколи проявляв територіальні реакції, однак вони мали локальний і короткочасний характер і не призводили до порушення загальної структури угруповання.

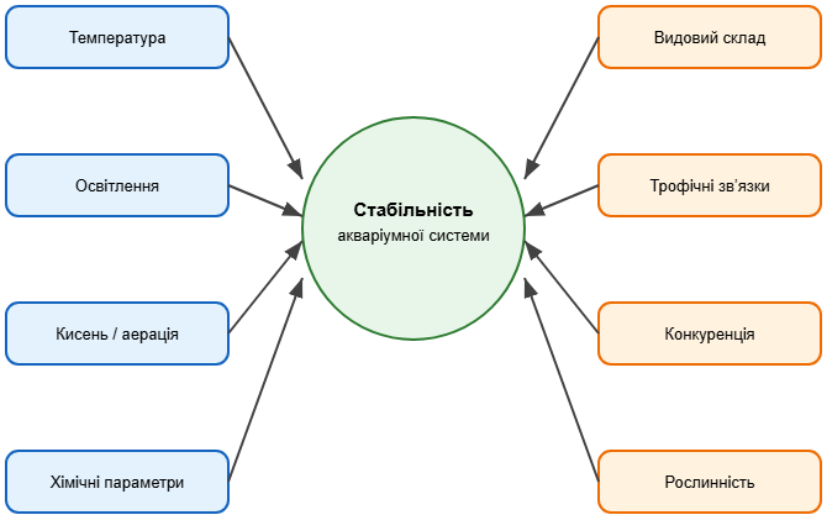


Рис. 3.2.1. Фактори стабільності акваріумної екосистеми.

Важливим чинником підтримання рівноваги стала диференціація екологічних ніш. Розподіл організмів за трофічними рівнями та просторовими зонами (поверхня, товща води, дно) зменшував інтенсивність конкуренції і забезпечував більш ефективне використання ресурсів. Це дозволяло системі функціонувати без різких коливань чисельності або поведінкової активності гідробіонтів.

Разом із тим, спостереження показали, що рівновага у такій системі має відносний характер і залежить від стабільності умов утримання. Зокрема, навіть незначне зменшення кількості корму призводило до підвищення активності гуппі та збільшення частоти їх контактів з іншими особинами. Це свідчить про чутливість системи до ресурсних обмежень і підкреслює важливість контролю умов.

Окремо оцінювався вплив абіотичних параметрів на стабільність. Підтримання температурного режиму, рівня освітлення та аерації забезпечувало відносну сталість середовища і сприяло нормальному функціонуванню гідробіонтів. Відсутність різких коливань цих показників протягом періоду дослідження дозволила уникнути стресових реакцій у організмів і забезпечила передбачуваний характер їх взаємодій.

Узагальнюючи отримані результати, можна зазначити, що екологічна рівновага в акваріумній системі формується як результат узгодженої дії біотичних і абіотичних факторів. Ключову роль відіграють видовий склад, розподіл функцій між організмами, наявність рослинного компонента та стабільність умов середовища. Порушення будь-якого з цих елементів може призвести до зміни характеру взаємодій і зниження стійкості системи. Основні фактори, що визначають стабільність акваріумної екосистеми, узагальнено на рисунку 3.2.1. Як видно з рисунка, стабільність системи забезпечується взаємодією комплексу абіотичних і біотичних факторів. Порушення будь-якого з цих елементів може призвести до зміни структури взаємодій і зниження стійкості екосистеми.

# ВИСНОВКИ

✓ У роботі обґрунтовано можливість використання акваріума як модельної екосистеми для дослідження екологічних взаємодій гідробіонтів. Показано, що контрольованість умов середовища та обмежений простір дозволяють відтворювати основні елементи функціонування водних екосистем і забезпечують наочність досліджуваних процесів.

✓ Розкрито особливості структури та функціонування водних екосистем, а також класифікацію екологічних взаємодій гідробіонтів. Встановлено, що трофічні зв’язки та конкурентні відносини є ключовими механізмами формування біоценозу та визначають динаміку екосистеми.

✓ Охарактеризовано акваріум як об’єкт дослідження та визначено основні абіотичні й біотичні фактори його функціонування. Доведено, що стабільність системи залежить від поєднання фізико-хімічних параметрів середовища та збалансованого видового складу організмів.

✓ Систематизовано методичні підходи до дослідження екологічних взаємодій у модельній екосистемі. Показано, що поєднання спостереження, експериментального моделювання та аналізу параметрів середовища забезпечує отримання достовірних результатів.

✓ У результаті проведених досліджень встановлено, що у сформованій акваріумній системі: гуппі (*Poecilia reticulata)*, неон червоний (*Paracheirodon axelrodi)*, гурамі перлинний (*Trichopodus leerii)*, анциструс (*Ancistrus sp.)*, хелена (*Anentome helena)*, неокаридина гетеропода (*Neocaridina heteropoda)*, валіснерія спіральна (*Vallisneria spiralis*) – сформувалася спрощена, але функціонально повноцінна трофічна структура з розподілом екологічних ніш.

✓ Виявлено, що інтенсивність трофічних і конкурентних взаємодій визначається насамперед доступністю ресурсів і щільністю організмів. Умови достатнього забезпечення кормом сприяють зниженню конкурентного

тиску, тоді як його обмеження призводить до активізації поведінкових реакцій і загострення взаємодій.

✓ Оцінка екологічної рівноваги показала, що акваріумна система здатна до відносної стабілізації за умови підтримання сталих абіотичних параметрів і збалансованого біотичного складу. Встановлено, що ключовими факторами стабільності є наявність рослинного компонента, диференціація трофічних рівнів, участь детритофагів та контроль умов середовища.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білявцева В.В., Мушит С.О., Сироватко К.М Основи акваріумістики. 2020. 320 с.

2. Буднік С. В., Колосок А.М . Акваріуміст-початківець: навчальний посібник . Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 156 с.

3. Бурлака, М. М. Кривий, Скоромна О.І. Годівля екзотичних тварин: навчальний посібник. Житомир, 2012. 358 с.

4. Васюкова Г.Т., Ярошева О.Г. Екологія. К.: Кондор, 2013. 524 с.

5. Вискушенко Д. А.,. Бенедик С. В., Поповичук О. І. Вплив азотнокислого свинцю на водний баланс ставковика озерного (Mollusca: Pulmonata: Lymnaeidae). Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка, 1999. 4. С. 87-88.

6. Вискушенко Д. А., Вискушенко А.П., Свеста Т.Л. Основи природознавства. Словник-довідник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2009. 31 с.

7. Вискушенко Д. А., Максименко Ю. В., Андрійчук Т. В., Молчанова М.В. Особливості утримання прісноводних креветок в акваріумі Implementation of modern technologies in science : proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference. Varna, 2022. С. 42-44.

8. Вискушенко Д. А., Никитюк Ю. А., Піціль А. О., Мельник Н. В. Теоретичні та методичні основи наукового дослідження в екологічній освіті. Екологічні науки, 2025. Вип. 63. С. 9-14. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.1

9. Вискушенко С. А. Фахова мова як об'єкт лінгвістичного дослідження. Наукові записки Національного університету «Острозька академія». 2015. № 58. С. 142-144

10. Дегтярьов П. А., Євтушенко М. Ю., Шерман І. Й. Фізіологія риб : Аграрна освіта, 2008. 341 с.

11. Заверуха Н.М., Серебряков А.В., Скиба Ю.А. Основи екології: Навч. посібник. К.: Каравела, 2006. 368 с.

12. Луньова О.В., Герасимчук О.Л., Кагукіна А.М. Аналіз стану водних ресурсів Житомирської області та їх вплив на організм людини. Екологічні науки, 2022. №6(45). С. 31–34. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.5

13. Максименко Ю.В., Вискушенко Д.А. Біоетика та біобезпека: навчальний посібник. Житомир : Вид-во ЖДУ імені Івана Франка, 2022. 126 с.

14. Куновський Ю.В., Присяжнюк Н.М., Гриневич Н.Є, Михальський О.Р. Біологія об'єктів декоративної аквакультури : Метод. вказівки до виконання практ. робіт. Біла Церква, 2018. 58 с.

15. Романенко В.Д. Основи гідроекології: Підручник. К.: Обереги, 2001. 728 с.

16. Сохацька О.М. Екологічна політика в системі публічного управління: виклики сталого розвитку. Філософія та управління. 2024. №2. с. 31-41

17. Ткачук Ю.О. Методичні підходи до вивчення гідробіонтів у контрольованих акваріумних умовах. Виклики сьогодення та наслідки Чорнобильської катастрофи. Екологія. Наука. Практика-2026 : матеріали XXII Всеукр. наук.-практ. конф. Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 75-77.

18. Федоненко О.В., Шарамок Т.С., Маренков О.М. Основи аквакультури: культивування мікроводоростей та безхребетних: навчальний посібник. Дніпропетровськ, 2014. 44 с.

19. Хвостик О. П., Вискушенко Д. А. Акваріумістика як засіб формування природничої компетентності у школярів. Реалізація наступності в природничій освіті: реалії та перспективи. Збірник науково-методичних праць. Житомир: Видавництво О.О. Євенок, 2018. С. 113-116

20. Шевченко П.Г., Пилипенко Ю.В. Основи систематики рибоподібних і риб. Навчальний посібник. Київ, 2016. 230 с.

21. Шефер К. С. Ваш акваріум. Універсальний довідник. Більш ніж 250 видів риб. Харьків, 2010. 192 с.

22. Яремчук С.М., Вік С.В., Кулаківська В.М., Ткачук Ю.О. Акваріумні моделі в системі цифрового екомоніторингу міських екосистем. 4th International Scientific and Practical Conference. Innovative Research in Science and Economy. Brussels: International Scientific Unity, 2026. p. 72-74

23. Cardoso B. J., Rodrigues E., Gaspar A. R., Gomes Á. Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review. Journal of Cleaner Production, 2021. Vol. 322. 129107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107

24. Chen H., Gao X., Yuan R. Advances in Remote Sensing and Sensor Technologies for Water-Quality Monitoring: A Review. *Water*, 2025. 17(20). 3000. https://doi.org/10.3390/w17203000

25. Essamlali I., Nhaila H., Khaili M. El. Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*, 2024. 10. 6. e27920. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27920

26. De Carvalho F.G., Loyau A., Kelly-Irving M., Schmeller D. S. Aquatic ecosystem indices, linking ecosystem health to human health risks. Biodivers Conserv, 2025. 34, P. 723–767. https://doi.org/10.1007/s10531-025-03010-3

27. Farouk M. I. H. Z., Jamil. Z., Latip M. F. A. Towards online surface water quality monitoring technology: A review. Environmental Research, 2023. 238: Part 1. 117147. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147

28. Gutiérrez-Zárate C., Veiga A., Gori A., Gerpe F., Domínguez L., Rodríguez A., Arias N., Álvarez M., Acerbi R., Vázquez L., Movilla J., Varela M. M., Alba-Salgueiro R., Valencia-Vila J., Orejas C. An aquaria set-up for long-term, multiple-stressor research in marine organisms. Methods in Ecology and Evolution, 2025. 16. P. 414–426. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14488

29. Haddout S., Priya K. L., Casila J. C., Kurniawan T. A. Smartphone solutions for water quality monitoring: a new frontier in environmental awareness. *Essential Chem*, 2024. 1(1). P. 1–9. https://doi.org/10.1080/28378083.2024.2371348

30. Keryan T., Radinger-Peer V., Zoderer B. M., Schinegger R., Asatryan V. Participatory approaches in aquatic ecosystem services valuation: insights from a systematic literature review and future research perspectives. Ecosystem Services, 2026. V. 77. 101808. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101808

31. Kwon S., Kang Y., Nam S. H., Kim Y. D. Water quality monitoring using hybrid physical-soft sensors for river digital twins: a comprehensive review. Water Science and Technology, 2025. 92(9). P. 1286–1307. https://doi.org/10.2166/wst.2025.145

32. Lesiv M. S., Polishchuk A. I., Antonyak H. L. Aquatic macrophytes: ecological features and functions. Studia Biologica, 2020. 14(2). P. 79-94. http://dx.doi.org/10.30970/sbi.1402.619

33. Li X., Xia R., Yang Z. *et al*. Restoration of aquatic vegetation can mitigate the risk of eutrophication in large shallow lakes. Sci Rep, 2026. **16**. 4111. https://doi.org/10.1038/s41598-025-31045-7

34. Nikora V. Hydrodynamics of aquatic ecosystems: An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics. River Research and Applications, 2010. 26. P. 367-384. https://doi.org/10.1002/rra.1291

35. Nogueira M. G., Kane D.D. Aquatic Ecosystems: Biodiversity and Conservation. Water, 2025. Vol. 17(15). 2321. https://doi.org/10.3390/w17152321

36. Protasov A., Barinova S., Novoselova T., Sylaieva A. The Aquatic Organisms Diversity, Community Structure, and Environmental Conditions. Diversity, 2019. Vol. 11(10). Article 190. https://doi.org/10.3390/d11100190

37. Shannon M. A., Bohn P. W., Elimelech M., Georgiadis J. G., Mariñas B. J., Mayes A. M. Science and technology for water purification in the coming decades. Nature, 2008. Vol. 452. P. 301–310. https://doi.org/10.1038/nature06599

38. Singh R. K., Murty H. R., Gupta S. K., Dikshit A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. Ecological Indicators, 2012. Vol. 15. P. 281–299. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007

39. Stadnychenko, A.P., Uvayeva, O.I., Vyskushenko, D.A. The influence of detergents on the cilia locomotion activity of epithelium in Sinanodonta Woodiana

(Mollusca, Unionidae). Біологія та екологія, 2019. 5 (1), P. 103–106. https://doi.org/10.33989/2414-9810.2019.5.1.195127

40. Windsor F. M. Expanding network ecology in freshwater ecosystems. Journal of Animal Ecology, 2023. 92, P. 1575–1588. https://doi.org/10.1111/1365-2656.13947