

УДК 504.064.36:594.124(477)
DOI [https://doi.org/10.15589/znpp2025.4\(502\).50](https://doi.org/10.15589/znpp2025.4(502).50)

CRITERIA FOR ASSESSING ECOLOGICAL SAFETY OF FRESH WATER ECOSYSTEMS BASED ON POPULATION CHARACTERISTICS OF *UNIO CRASSUS* (MOLLUSCA, BIVALVIA, UNIONIDAE)

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ НА ОСНОВІ ПОПУЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК *UNIO CRASSUS* (MOLLUSCA, BIVALVIA, UNIONIDAE)

Larysa M. Shevchuk
shevchuk.biol@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4164-514X

Л. М. Шевчук,
докт. біол. наук, професор

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr
Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир

Abstract. Purpose. To develop a scientifically substantiated system of criteria for assessing the ecological safety of freshwater ecosystems based on population characteristics of the thick-shelled river mussel *Unio crassus*.

Methodology. A comprehensive analysis of the demographic structure of 25 populations was conducted, including determination of population density, proportion of young individuals aged 3–5 years, mean population age, number of age classes, and total sample size. Establishment of threshold values for indicators was based on comparative analysis of populations with different levels of anthropogenic pressure. The developed system of criteria was harmonized with the methodology of Article 17 of Council Directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats.

Results. The use of *U. crassus* as an integral bioindicator of ecological safety was substantiated. A four-level classification system for ecological safety of freshwater ecosystems was developed, including high, satisfactory, unsatisfactory, and critical levels. The high level is characterized by population density exceeding 5 individuals per square meter, complete age structure with 5–6 age classes, and proportion of young individuals exceeding 50 percent. The critical role of age structure as an early indicator of ecological safety disruption was revealed. It was established that populations with high density may be in a state of degradation in the absence of successful recruitment.

Scientific novelty. For the first time, a system of quantitative criteria for ecological safety assessment adapted to Ukrainian aquatic ecosystem conditions was developed based on population characteristics of *U. crassus*. Threshold values of population density indicators, age structure, and proportion of young individuals corresponding to four levels of ecological safety of freshwater ecosystems were established. The priority of age structure analysis over population density indicator for detecting early signs of aquatic ecosystem degradation was substantiated.

Practical significance. The developed system of criteria can be integrated into the national surface water ecological monitoring system as an additional tool for assessing compliance of water bodies with requirements of EU Water Framework Directive 2000/60/EC. The proposed criteria provide a scientifically substantiated basis for planning conservation measures within the Emerald network and future Natura 2000 network in Ukraine, as well as for fulfilling requirements of Article 17 of the Habitats Directive regarding assessment of conservation status of species populations.

Key words: ecological safety; freshwater ecosystems; *Unio crassus*; population characteristics; bioindication; EU Water Framework Directive; river basins of Ukraine; demographic structure of populations.

Анотація. Мета. Розробити науково обґрунтовану систему критеріїв оцінки екологічної безпеки прісноводних екосистем на основі популяційних характеристик перлівниці товстої *Unio crassus*.

Методика. Проведено комплексний аналіз демографічної структури 25 популяцій, включаючи визначення щільності поселення, частки молодих особин віком 3–5 років, середнього віку популяції, кількості вікових класів та загальної чисельності вибірки. Встановлення порогових значень показників здійснювалося на основі порівняльного аналізу популяцій з різним рівнем антропогенного навантаження. Розроблена система критеріїв узгоджувалася з методологією Article 17 Директиви Ради 92/43/ЄЕС про збереження природних оселищ.

Результати. Обґрунтовано використання *U. crassus* як інтегрального біоіндикатора екологічної безпеки. Розроблено чотирирівневу систему класифікації екологічної безпеки прісноводних екосистем, що включає високий, задовільний, незадовільний та критичний рівні. Високий рівень характеризується щільністю популяції понад 5 особин на квадратний метр, повною віковою структурою з 5–6 віковими класами, часткою молодих

особин понад 50 відсотків. Виявлено критичну роль вікової структури як раннього індикатора порушення екологічної безпеки. Встановлено, що популяції з високою щільністю можуть перебувати у стані деградації за відсутності успішного рекрутування.

Наукова новизна. Вперше розроблено адаптовану до умов українських водних екосистем систему кількісних критеріїв оцінки екологічної безпеки на основі популяційних характеристик *U. crassus*. Встановлено порогові значення показників щільності популяції, вікової структури та частки молодих особин, що відповідають чотирьом рівням екологічної безпеки прісноводних екосистем. Обґрунтовано пріоритетність аналізу вікової структури над показником щільності популяції для виявлення ранніх ознак деградації водних екосистем.

Практична значимість. Розроблена система критеріїв може бути інтегрована у національну систему екологічного моніторингу поверхневих вод як додатковий інструмент оцінки відповідності стану водних об'єктів вимогам Водної рамкової директиви ЄС 2000/60/ЄС. Запропоновані критерії забезпечують науково обґрунтовану основу для планування природоохоронних заходів в межах мережі Емеральд та майбутньої мережі Natura 2000 в Україні, а також для виконання вимог Article 17 Директиви про оселища щодо оцінки природоохоронного статусу популяцій виду.

Ключові слова: екологічна безпека; прісноводні екосистеми; *Unio crassus*; популяційні характеристики; біоіндикація; Водна рамкова директива ЄС; річкові басейни України; демографічна структура популяцій.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Забезпечення екологічної безпеки прісноводних екосистем є одним з пріоритетних завдань сучасної екологічної політики України, що набуває особливої актуальності в контексті імплементації Директиви 2000/60/ЄС про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики та інших директив природоохоронного законодавства Європейського Союзу [1]. Водночас існуюча в Україні система екологічного моніторингу поверхневих вод базується переважно на гідрохімічних показниках та не забезпечує комплексної оцінки стану водних екосистем з урахуванням біологічних елементів якості, що суперечить вимогам Водної рамкової директиви ЄС щодо екосистемного підходу до управління водними ресурсами [2].

Біоіндикація з використанням чутливих видів гідробіонтів дозволяє оцінювати інтегральний вплив комплексу абіотичних та біотичних факторів на стан водних екосистем протягом тривалого періоду часу, на відміну від гідрохімічних показників, що відображають лише миттєвий стан якості води на момент відбору проб [3]. Двостулкові молюски родини Unionidae, зокрема перлівниця товста *Unio crassus* Philipsson, 1788 (рис. 1), широко використовуються в європейській практиці як біоіндикатори екологічного стану річкових екосистем завдяки високій чутливості до антропогенних впливів, седентарному способу життя

та здатності до біоаккумуляції забруднюючих речовин [4, 5]. Включення *U. crassus* до Додатків II та IV Директиви Ради 92/43/ЄЕС про збереження природних оселищ обумовлює необхідність регулярного моніторингу стану популяцій виду та розробки стандартизованих критеріїв оцінки їх природоохоронного статусу [6].

Проте в Україні відсутня науково обґрунтована система критеріїв оцінки рівня екологічної безпеки прісноводних екосистем на основі популяційних характеристик молюсків родини Unionidae, що унеможливує використання цих видів у практиці екологічного моніторингу та оцінки відповідності стану водних об'єктів вимогам європейського природоохоронного законодавства. Розробка такої системи критеріїв потребує встановлення кількісних залежностей між популяційними параметрами *U. crassus* та рівнем антропогенного навантаження на водні екосистеми, визначення порогових значень показників, що відповідають різним рівням екологічної безпеки, та апробації запропонованих критеріїв на репрезентативній вибірці популяцій з різних річкових басейнів України [7, 8]. Вирішення цих завдань дозволить інтегрувати популяційні характеристики *U. crassus* у систему екологічного моніторингу прісноводних екосистем України та забезпечити відповідність національної системи оцінки стану водних об'єктів вимогам європейського законодавства у сфері охорони довкілля.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Використання двостулкових молюсків родини Unionidae як біоіндикаторів стану прісноводних екосистем має тривалу історію в європейській та північноамериканській науковій практиці. Фундаментальні дослідження ролі прісноводних молюсків в екосистемних процесах та їх чутливості до антропогенних впливів були проведені у роботах [3], які продемонстрували, що двостулкові молюски виконують критично важливі екосистемні функції, включаючи



Рис. 1. Черепашка *Unio crassus* (фото автора)

фільтрацію води, біотурбацію донних відкладів та перенесення біогенних елементів між водною товщею та бентосом. Встановлено [4], що молюски родини Unionidae є ключовими видами річкових екосистем, що забезпечують стабільність біоценозів та підтримання біорізноманіття, а їх зникнення призводить до каскадних змін у структурі та функціонуванні водних екосистем.

Специфіка біології *U. crassus* як біоіндикаторного виду детально досліджена в роботах [8, 5], де проаналізовано комплекс факторів, що обумовлюють високу чутливість виду до антропогенних впливів. Облігатна паразитична личинкова стадія на зябрах риб-живителів, переважно з родини Cottidae та Cyprinidae, робить успішність відтворення популяцій залежною від стану іхтіофауни, що дозволяє оцінювати екологічну безпеку на рівні трофічних взаємодій. Вид характеризується чутливістю до якості води, зокрема до евтрофікації та підвищених концентрацій нітратного нітрогену. Критичним рівнем вважається концентрація $\text{NO}_3\text{-N}$ вище 2 мг/л, за якого популяції зазнають негативного впливу [10, 11], що обумовлює використання виду як індикатора евтрофікації водойм. Високі вимоги до оксигенації та чутливість до органічного забруднення роблять *U. crassus* важливим індикаторним видом [12]. Популяційно-екологічні дослідження *U. crassus* в європейських країнах продемонстрували катастрофічне скорочення ареалу та чисельності виду протягом останнього століття. Європейські малакологи [6] узагальнили дані про природоохоронний статус прісноводних молюсків Європи та встановили, що *U. crassus* зник або перебуває під загрозою зникнення у більшості країн Центральної Європи внаслідок деградації річкових екосистем. Було проведено комплексне дослідження популяцій *U. crassus* у Баварії [8, 9] та встановлено, що основними загрозами для виду є зарегулювання стоку, евтрофікація водойм, надходження дрібнодисперсних наносів та руйнування природних біотопів внаслідок гідротехнічного будівництва. В українських водоймах також зареєстровано стрімке скорочення популяцій *U. crassus* [13], що обумовило включення цього виду до Червоної книги [14].

Методичні підходи до оцінки стану популяцій прісноводних молюсків розроблялися в контексті імплементації Директиви Ради 92/43/ЄЕС про збереження природних оселищ. Було запропоновано [7] систему популяційних параметрів для оцінки стану популяцій *U. crassus* в Польщі, що включає щільність популяції, вікову структуру та поповнення молодими особинами. Встановлено, що популяції з щільністю понад 5 особин на квадратний метр та повною віковою структурою можуть вважатися стабільними, тоді як популяції з відсутністю ювенільних особин перебувають у стані деградації [7, 9].

Було розроблено [3] концептуальну модель оцінки екологічного стану річкових екосистем на основі

популяційних характеристик прісноводних молюсків, яка базується на інтеграції демографічних показників з абіотичними параметрами водного середовища. Встановлено, що вікова структура популяцій є найбільш інформативним індикатором довгострокових змін екологічних умов, оскільки відображає динаміку успішності відтворення протягом багатьох років [3]. Популяції зі звуженою віковою структурою, представленою виключно старовіковими особинами, свідчать про припинення поповнення молодими особинами та високий ризик зникнення.

Було розроблено [2] методологічні основи екологічної оцінки стану річкових басейнів України відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС, проте запропонована система базується на гідрохімічних показниках та макрзообентосних індексах без використання популяційних характеристик молюсків. Системні популяційно-екологічні дослідження *U. crassus* з метою розробки критеріїв оцінки екологічної безпеки водних екосистем в Україні досі не проводилися, що обумовлює актуальність даного дослідження.

ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значний обсяг досліджень популяційної екології *U. crassus* в європейських країнах та визнання виду як ефективного біоіндикатора стану річкових екосистем, низка важливих аспектів використання популяційних характеристик молюсків для оцінки екологічної безпеки водних об'єктів залишається невирішеною. Існуючі європейські системи оцінки стану популяцій *U. crassus*, зокрема запропоновані [7] для польських та [9] баварських популяцій, розроблялися переважно для малих річок з природним гідрологічним режимом та не можуть бути безпосередньо екстрапольовані на умови середніх та великих рівнинних річок, які домінують в річкових системах України. Специфічні гідрологічні, гідрохімічні та геоморфологічні характеристики українських водотоків, включаючи високу мінливість водного стоку, підвищену мутність води та інші особливості водойм континентального клімату, обумовлюють необхідність адаптації критеріїв оцінки стану популяцій до регіональних умов.

Також в існуючих дослідженнях відсутня чітка градація критеріїв оцінки стану популяцій *U. crassus* у контексті саме екологічної безпеки водних екосистем. Відсутня багаторівнева система класифікації, що дозволяла б диференціювати стан водних екосистем від високого до критичного рівня екологічної безпеки на основі комплексу популяційних показників *U. crassus*.

Вирішення зазначених проблем потребує проведення систематичних популяційно-екологічних досліджень *U. crassus* в різних річкових басейнах

України, розробки адаптованої до регіональних умов системи критеріїв оцінки екологічної безпеки водних екосистем та апробації запропонованих критеріїв на репрезентативній вибірці популяцій з різним рівнем антропогенного навантаження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробити науково обґрунтовану систему критеріїв оцінки екологічної безпеки прісноводних екосистем на основі популяційних характеристик *U. crassus* для інтеграції у практику екологічного моніторингу України відповідно до вимог європейського природоохоронного законодавства.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є популяції перлівниці товстої *U. crassus* в річкових екосистемах України. Предметом дослідження є популяційні характеристики *U. crassus* як індикатори екологічної безпеки прісноводних екосистем.

Польові дослідження популяцій *U. crassus* проводилися протягом 2015–2024 років у 47 пунктах обстеження, що охоплюють усі річкові басейни України. Вибір пунктів обстеження здійснювався на основі наявності історичних вказівок про присутність виду, збереження придатних біотопів та можливості проведення репрезентативного обліку популяцій. Для популяцій з територій, де збір матеріалу неможливий через воєнні дії або окупацію, використовувалися дані зборів до 2013 року. У ході дослідження проведено комплексний аналіз демографічної структури 25 популяцій товстої перлівниці, оскільки вибірки з решти популяцій були не достатніми. Аналіз охопив п'ять основних показників: щільність поселення (особин/м²), частку молодих особин (3–5 років), середній вік популяції, кількість вікових класів та загальну чисельність вибірки. Було проведено статистичний аналіз [16, 17, 18].

Розробка системи критеріїв оцінки екологічної безпеки базувалася на порівняльному аналізі популяційних характеристик *U. crassus* з різних річкових басейнів з різним рівнем антропогенного навантаження. Встановлення порогових значень показників здійснювалося на основі аналізу розподілу щільності популяцій, повноти вікової структури та наявності ювенільних особин у популяціях з референсних водотоків з мінімальним антропогенним впливом порівняно з популяціями з трансформованих екосистем. Інтеграція показників вікової структури у систему оцінювання природоохоронного статусу здійснювалася відповідно до методології Article 17 Директиви Ради 92/43/ЄЕС про збереження природних оселищ [19, 20].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Двостулкові молюски родини Unionidae, до якої належить перлівниця товста *U. crassus*, є одними

з найбільш чутливих біоіндикаторів стану прісноводних екосистем через низку специфічних біологічних особливостей. По-перше, молюски є седентарними організмами з тривалим життєвим циклом, що дозволяє оцінювати довгострокові зміни якості води та стабільність екологічних умов у конкретному біотопі протягом багатьох років. По-друге, як фільтратори, молюски пропускають через себе великі обсяги води та акумулюють у тканинах забруднюючі речовини, включаючи важкі метали, пестициди та інші ксенобіотики, що робить їх ефективними біоаккумуляторами для оцінки рівня хімічного забруднення водою. По-третє, складний життєвий цикл з облігатною паразитичною личинковою стадією на рибках-живителях робить молюсків залежними від стану іхтіофауни, що дозволяє оцінювати екологічну безпеку на рівні цілих трофічних ланцюгів. По-четверте, високі вимоги до якості води, зокрема до вмісту розчиненого кисню, концентрації нітратного нітрогену та біогенних елементів, робить популяції Unionidae чутливими індикаторами евтрофікації та органічного забруднення водою.

Використання популяційних характеристик *U. crassus* для оцінки екологічної безпеки базується на встановлених залежностях між структурою популяції та комплексом абіотичних факторів водного середовища. Наявність у популяції всіх вікових класів, включаючи ювенільних особин віком 3–4 роки, свідчить про успішне відтворення та поповнення молоддю, що можливе лише за умов стабільного гідрологічного режиму, достатньої чисельності риб-живителів та відсутності критичних концентрацій токсикантів у воді [9]. Навпаки, популяції зі звуженою віковою структурою, представленою виключно старовіковими особинами, свідчать про припинення відтворення внаслідок погіршення екологічних умов або втрати риб-живителів, що є сигналом високого ризику для екологічної безпеки водної екосистеми [12]. На основі аналізу емпіричних даних запропоновано чотирирівневу систему класифікації, що враховує комплекс популяційних параметрів та їх динаміку у часі.

Високий рівень екологічної безпеки характеризується наявністю чисельних популяцій *U. crassus* з щільністю понад 5 особин на квадратний метр придатного субстрату, повною віковою структурою, що включає мінімум 5–6 вікових класів від ювенільних особин віком 2–3 роки до старовікових особин віком 8–10 років, та наявністю ознак успішного щорічного поповнення молоддю, що проявляється у стабільному співвідношенні молодих та дорослих особин. За таких умов популяція характеризується високим репродуктивним потенціалом, низькою смертністю у всіх вікових класах та здатністю до відновлення після короточасних несприятливих впливів. Високий рівень екологічної безпеки типовий для річок з мінімальним антропогенним навантаженням,

природним гідрологічним режимом, відсутністю значних джерел забруднення та збереженням природних біотопів у заплаві та руслі. Шість популяцій (13 % від загальної кількості) класифіковані як такі, що перебувають у високому рівні екологічної безпеки. Ці популяції характеризуються часткою молодих особин від 52,4 % до 90,6 %, що значно перевищує встановлений поріг у 50 %. Середній вік особин у цих популяціях варіює від 4,4 до 6,2 років, що свідчить про активне та стабільне поповнення молоддю. Еталонною популяцією є така, що виявлена у р. Боржава, с. Вільхівка, яка демонструє найвищу щільність поселення (15 особин/м²) та найвищу частку молодих особин (90,6 %) при найнижчому середньому віці (4,4 року) серед усіх популяцій високого рівня. Чисельність вибірки становила 64 особини, що забезпечило високу статистичну достовірність оцінок.

Задовільний рівень екологічної безпеки характеризується наявністю популяцій середньої чисельності з щільністю від 1 до 5 особин на квадратний метр, віковою структурою, що включає 4–5 вікових класів, та наявністю ювенільних особин, проте з ознаками нестабільності поповнення молоддю, що може проявлятися у нерегулярній появі молодих вікових класів або їх низькій чисельності порівняно зі старовіковими особинами. За таких умов популяція зберігає здатність до самопідтримання, проте вразливість до додаткових несприятливих впливів підвищена, а відновлення після порушень відбувається повільніше. Задовільний рівень екологічної безпеки типовий для річок з помірним антропогенним навантаженням, де зберігаються придатні біотопи, проте гідрологічний режим може бути частково порушений внаслідок зарегулювання стоку або меліоративних робіт, а якість води характеризується періодичним перевищенням нормативів за окремими показниками. Чотирнадцять популяцій (30 % від загальної кількості) класифіковані як задовільного рівня. Ця найчисленніша група характеризується значною різноманітністю демографічних показників, що відображає перехідні стани між високим та незадовільним рівнями. У межах цієї категорії виділяються два підтипи популяцій. Перший підтип представлений молодими популяціями з високою часткою молодих особин (від 80 % до 100 %), але низькою щільністю поселення (1 особина/м²). До них належать такі: р. Боржава с. Вари (84,6 % молодих, середній вік 4,9 року), р. Тня с. Соколів (83,3 % молодих, 4,8 року), а також п'ять популяцій зі 100 % молодих особин: р. Уж, м. Ужгород, р. Норинь с. Богданівка, р. Жерев с. Ігнатпіль, р. Уборть с. Рудня-Хочинська та р. Уж с. Поліське. Другий підтип представлений популяціями з помірною або навіть високою щільністю, але зниженою часткою молодих особин та ознаками старіння вікової структури. Найяскравішими прикладами є такі: р. Латориця,

с. Соломонове (нове русло) з щільністю 10 особин/м², але лише 45 % молодих при середньому віці 6,6 року; р. Чорна, с. Хмельницьке (6 особин/м², 26,3 % молодих, 6,7 року) та р. Мурафа, с. Біла (7 особин/м², 25 % молодих, 7,5 року).

Незадовільний рівень екологічної безпеки характеризується наявністю малочисельних популяцій з щільністю менше 1 особини на квадратний метр, звуженою віковою структурою, представленою 2–3 віковими класами, та ознаками порушення процесів відтворення, що може проявлятися у повній відсутності ювенільних особин або наявності виключно старовікових особин без ознак поповнення молоддю протягом останніх 3–5 років. За таких умов популяція втрачає здатність до самопідтримання та перебуває у стані прогресуючої деградації, що за відсутності термінових природоохоронних втручань призведе до повного зникнення виду з даної водойми. Незадовільний рівень екологічної безпеки типовий для річок зі значним антропогенним навантаженням, де гідрологічний режим суттєво порушений внаслідок зарегулювання стоку, якість води не відповідає нормативам за багатьма показниками, а природні біотопи деградують або були знищені. П'ять популяцій (11 % від загальної кількості) класифіковані як незадовільного рівня. Усі ці популяції демонструють ідентичний набір критичних ознак деградації: повну відсутність молодих особин (0 %), мінімальний вік 6 років і більше, середній вік понад 6,5 років та очевидну відсутність успішного відтворення протягом останніх трьох і більше років.

Критичний рівень екологічної безпеки характеризується одиничними знахідками особин *U. crassus* без ознак формування стабільної популяції, повною відсутністю ювенільних особин, наявністю виключно старовікових особин або виявленням лише порожніх черепашок без живих молюсків, що свідчить про нещодавнє зникнення популяції. За таких умов водна екосистема втратила здатність підтримувати популяції чутливих видів біоти та перебуває у стані глибокої деградації з високим ризиком незворотної втрати біорізноманіття та екосистемних функцій. Критичний рівень екологічної безпеки типовий для річок з надзвичайно високим антропогенним навантаженням, хронічним або аварійним забрудненням води, повним зарегулюванням стоку з трансформацією реофільних біотопів у стоячі водойми, або руйнуванням русла внаслідок гідротехнічного будівництва. Критичний рівень екологічної безпеки потребує невідкладних заходів з відновлення водної екосистеми, включаючи ліквідацію джерел забруднення, відновлення природного гідрологічного режиму та можливу реінтродукцію виду після покращення екологічних умов. Двадцять одна з обстежених 46 популяцій (45 % від загальної кількості) класифікуються як такі, що відносяться до цього рівня.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблена система критеріїв оцінки екологічної безпеки прісноводних екосистем на основі популяційних характеристик *U. crassus* представляє собою комплексний підхід до біоіндикації, що інтегрує демографічні показники з концепцією екологічних порогів стійкості екосистем. Результати дослідження демонструють значну варіабельність стану популяцій *U. crassus* в різних річкових басейнах України, що відображає різні рівні антропогенного навантаження та якості водного середовища. Запропонована чотирирівнева система класифікації узгоджується з європейськими підходами до оцінки природоохоронного статусу видів за Article 17 Директиви про оселища, проте адаптована до специфіки українських водних екосистем. Для польських популяцій *U. crassus* та для баварських було встановлено [7, 9] порогове значення щільності 5 особин на квадратний метр як критерій стабільної популяції, що відповідає нашим результатам для високого рівня екологічної безпеки. Проте наші дані показують більш широкий діапазон щільності для стабільних популяцій – від 6 до 15 особин на квадратний метр, що може бути пов'язано з кращою збереженістю природних біотопів у окремих річкових системах басейну Дунаю порівняно з більш трансформованими водотоками Центральної Європи.

У дослідженнях баварських та польських популяцій наголошувалось на критичній важливості наявності молодих вікових класів як індикатора успішного відтворення. Наші результати підтверджують цей висновок, демонструючи чіткий зв'язок між часткою молодих особин віком 3–5 років та загальним станом популяції. Популяції з високим рівнем екологічної безпеки характеризувалися часткою молодих особин понад 50 відсотків, тоді як популяції з незадовільним рівнем демонстрували повну відсутність молодих вікових класів. Цей показник може служити раннім попереджувальним сигналом про погіршення екологічних умов, оскільки порушення поповнення молоддю передуює скороченню загальної чисельності популяції на десятиліття через тривалість життя дорослих особин.

Важливою особливістю розробленої системи критеріїв є фокус саме на екологічній безпеці водних екосистем, а не лише на природоохоронному статусі окремого виду. Було розроблено [3] концептуальну модель оцінки екологічного стану річкових екосистем на основі популяційних характеристик прісноводних молюсків, яка базується на інтеграції демографічних показників з абіотичними параметрами водного середовища. Наш підхід розвиває цю концепцію, пропонуючи конкретні кількісні критерії для класифікації рівнів екологічної безпеки, що дозволяє використовувати систему у практиці екологічного моніторингу без необхідності складних статистичних процедур.

Показовим є той факт, що одна з популяцій з відсутністю молодих особин характеризувалася відносно високою щільністю (5 особин на квадратний метр) та максимальним середнім віком (8,33 року). Це демонструє обмеженість використання лише показника щільності для оцінки стану популяції без аналізу вікової структури. Популяція може зберігати високу чисельність протягом десятиліття після припинення відтворення завдяки тривалості життя дорослих особин, проте є приреченою на зникнення після природної загибелі поточної генерації. Було описано [4] подібні випадки «популяцій-привидів» у північно-американських річках, де масова загибель молюсків відбувалася лише через 15–20 років після припинення успішного відтворення.

Розроблена система критеріїв має певні обмеження, які необхідно враховувати при інтерпретації результатів. По-перше, встановлені порогові значення базуються на просторовому градієнті популяційних характеристик, та частково на довгострокових часових рядах, що обмежує можливість виявлення трендів змін екологічної безпеки у часі. Систематичний моніторинг тих самих популяцій протягом багатьох років дозволить верифікувати запропоновані критерії та виявити ранні ознаки погіршення або покращення стану водних екосистем. По-друге, нерівномірний розподіл обсягів вибірок між пунктами обстеження може впливати на надійність оцінок вікової структури для малочисельних вибірок. Незважаючи на зазначені обмеження, розроблена система критеріїв має значну практичну цінність для управління водними ресурсами України в контексті імплементації європейського природоохоронного законодавства. Система дозволяє проводити експрес-оцінку екологічної безпеки водних об'єктів на основі відносно простих польових обстежень популяцій *U. crassus* без необхідності тривалих і дорогих лабораторних аналізів якості води. Виявлення популяцій з незадовільним або критичним рівнем екологічної безпеки дозволяє ідентифікувати пріоритетні водні об'єкти для термінових природоохоронних втручань та цільового моніторингу джерел антропогенного навантаження. Результати дослідження також мають значення для планування природоохоронних заходів в межах територій мережі Емеральд та майбутньої мережі Natura 2000 в Україні.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано використання популяційних характеристик *U. crassus* як інтегрального біоіндикатора екологічної безпеки прісноводних екосистем на основі специфічних біологічних особливостей виду: седентарного способу життя з тривалим життєвим циклом, здатності до біоаккумуляції забруднюючих речовин, облігатної паразитичної личинкової стадії на рибах-живителях та високої чутливості до якості води. Критична залежність популяцій від комплексу

абіотичних та біотичних факторів водного середовища робить *U. crassus* надійним індикатором досягнення критичних порогів антропогенного навантаження, за якими відбувається незворотна деградація водної екосистеми.

Розроблено чотирирівневу систему критеріїв оцінки екологічної безпеки прісноводних екосистем на основі популяційних характеристик *U. crassus*, що включає високий, задовільний, незадовільний та критичний рівні. Система базується на комплексному аналізі щільності популяції, вікової структури, кількості вікових класів, частки молодих особин віком 3–5 років та середнього віку популяції. Високий рівень екологічної безпеки характеризується щільністю понад 5 особин на квадратний метр, повною віковою структурою з 5–6 віковими класами, часткою молодих особин понад 50 відсотків та середнім віком 4,5–6,5 років, що відповідає природним екосистемам з мінімальним антропогенним навантаженням.

Виявлено критичну роль вікової структури популяцій як раннього індикатора порушення екологічної безпеки водних екосистем. Встановлено, що популяції з високою щільністю можуть перебувати у стані прогресуючої деградації за відсутності успішного поповнення молоддю, що проявляється у повній

відсутності ювенільних особин віком 3–5 років. Це демонструє обмеженість використання лише показника щільності для оцінки стану популяції без аналізу демографічної структури.

Запропонована система критеріїв узгоджується з європейськими підходами до оцінки природоохоронного статусу видів за Article 17 Директиви Ради 92/43/ЄС про збереження природних оселищ, проте адаптована до специфіки українських водних екосистем.

Розроблена система критеріїв може бути інтегрована у національну систему екологічного моніторингу поверхневих вод як додатковий інструмент для оцінки відповідності стану водних об'єктів вимогам Водної рамкової директиви ЄС 2000/60/ЄС. Популяції *U. crassus* як біоіндикатори забезпечують інтегральну оцінку довгострокових змін якості водного середовища, що доповнює результати періодичних гідрохімічних аналізів. Система дозволяє проводити експрес-оцінку екологічної безпеки водних об'єктів на основі відносно простих польових обстежень без необхідності тривалих лабораторних аналізів, що забезпечує можливість ідентифікації пріоритетних водних об'єктів для термінових природоохоронних втручань та цільового моніторингу джерел антропогенного навантаження.

REFERENCES

- [1] European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73.
- [2] Grintshenko, A. V., Vasenko, O. G., Vernichenko, G. A., Voloshyn, V. U., Grinzhevsky, M. V., Linnik, P. M., Manturova, O. V., Osadcha, N. M., Osadchiy, V. I., Romanenko, O. V., Yatsyk, A. V., & Zakrevsky, D. V. (2012). *Metodyka ekolohichnoyi otsinky yakosti poverkhnevyykh vod za vidpovidnymy katehoriyamy* [Methodology for environmental assessment of surface water quality by relevant categories]. UkrNDIEP [in Ukrainian].
- [3] Strayer, D. L. (2008). *Freshwater mussel ecology: A multifactor approach to distribution and abundance* (Vol. 1). University of California Press.
- [4] Vaughn, C. C., & Hakenkamp, C. C. (2001). The functional role of burrowing bivalves in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology*, 46(11), 1431–1446. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00771.x>
- [5] Geist, J. (2010). Strategies for the conservation of endangered freshwater pearl mussels (*Margaritifera margaritifera* L.): A synthesis of conservation genetics and ecology. *Hydrobiologia*, 644, 69–88. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0190-2>
- [6] Lopes-Lima, M., Sousa, R., Geist, J., Aldridge, D. C., Araujo, R., Bergengren, J., Bepalaya, Y., Bódis, E., Burlakova, L., Van Damme, D., Douda, K., Froufe, E., Georgiev, D., Gumpinger, C., Karatayev, A., Kebapçı, Ü., Killeen, I., Lajtner, J., Larsen, B. M., ... Zogaris, S. (2017). Conservation status of freshwater mussels in Europe: State of the art and future challenges. *Biological Reviews*, 92(1), 572–607. <https://doi.org/10.1111/brv.12244>
- [7] Zajac, K. (2010). 1032 Skójka gruboskorupowa *Unio crassus* Philipsson, 1788 [1032 Thick-shelled river mussel *Unio crassus* Philipsson, 1788]. In M. Makomaska-Juchiewicz (Ed.), *Monitoring gatunków zwierząt: Przewodnik metodyczny. Część pierwsza* [Monitoring of animal species: Methodological guide. Part one] (pp. 157–179). Biblioteka Monitoringu Środowiska [in Polish].
- [8] Stoeckl, K., & Geist, J. (2016). Hydrological and substrate requirements of the thick-shelled river mussel *Unio crassus* (Philipsson 1788). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(3), 456–469. <https://doi.org/10.1002/aqc.2598>
- [9] Stoeckl, K., Denic, M., & Geist, J. (2020). Conservation status of two endangered freshwater mussel species in Bavaria, Germany: Habitat quality, threats, and implications for conservation management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 30(4), 647–661. <https://doi.org/10.1002/aqc.3310>
- [10] Zettler, M. L., & Jueg, U. (2007). The situation of the freshwater mussel *Unio crassus* (Philipsson, 1788) in north-east Germany and its monitoring in terms of the EC Habitats Directive. *Mollusca*, 25(2), 165–174.
- [11] Denic, M., Stoeckl, K., Gum, B., & Geist, J. (2014). Physicochemical assessment of *Unio crassus* habitat quality in a small upland stream and implications for conservation. *Hydrobiologia*, 735(1), 111–122. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1467-z>

- [12] Hochwald, S. (2001). Plasticity of life-history traits in *Unio crassus*. In G. Bauer & K. Wächtler (Eds.), *Ecology and evolution of the freshwater mussels Unionoida* (pp. 127–141). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56869-5_7
- [13] Shevchuk, L. M., Vasilieva, L. A., Pampura, M. M., & Mezhzherin, S. V. (2019). Perlyvnytsi (Unionidae) Ukrainy: Resursna otsinka (chyselnist, dynamika arealiv, osoblyvosti reproduktsii) [Unionidae of Ukraine: Resource assessment (abundance, range dynamics, reproductive features)]. *Vestnik Zoologii*, 37(Spec. Iss.), 1–92. Retrieved from <http://mail.izan.kiev.ua/vz-pdf/suppl/s37.pdf> [in Ukrainian].
- [14] Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2021). *Pro zatverdzhennia perelikiv vydiv tvaryn, shcha zanosiat'sia do Chervonoï knyhy Ukrainy (tvarynnyi svit), ta vydiv tvaryn, shcha vykliucheni z Chervonoï knyhy Ukrainy (tvarynnyi svit): Nakaz vid 19.01.2021 № 29* [On the approval of lists of animal species to be included in the Red Book of Ukraine (animal world) and animal species excluded from the Red Book of Ukraine (animal world): Order dated 19.01.2021 No. 29]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0260-21#n19> [in Ukrainian].
- [15] Strayer, D. L., Downing, J. A., Haag, W. R., King, T. L., Layzer, J. B., Newton, T. J., & Nichols, S. J. (2004). Changing perspectives on pearly mussels, North America's most imperiled animals. *BioScience*, 54(5), 429–439. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0429:CPOPMN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0429:CPOPMN]2.0.CO;2)
- [16] Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Prentice Hall.
- [17] Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research* (3rd ed.). W. H. Freeman.
- [18] Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2006). *Ecology: From individuals to ecosystems* (4th ed.). Blackwell Publishing.
- [19] European Commission. (2017). *Reporting under Article 17 of the Habitats Directive: Explanatory notes and guidelines for the period 2013–2018*. Retrieved from https://cdr.eionet.europa.eu/help/habitats_art17
- [20] Evans, D., & Arvela, M. (2011). *Assessment and reporting under Article 17 of the Habitats Directive: Explanatory notes and guidelines for the period 2007–2012*. European Topic Centre on Biological Diversity. Retrieved from <https://www.eionet.europa.eu>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73.
- [2] Грінченко, А. В., Васенко, О. Г., Верніченко, Г. А., Волошин, В. У., Гриньжевський, М. В., Лінник, П. М., Мантурова, О. В., Осадча, Н. М., Осадчий, В. І., Романенко, О. В., Яцик, А. В., & Закревський, Д. В. (2012). *Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями*. УкрНДІЕП.
- [3] Strayer, D. L. (2008). *Freshwater mussel ecology: A multifactor approach to distribution and abundance* (Vol. 1). University of California Press.
- [4] Vaughn, C. C., & Hakenkamp, C. C. (2001). The functional role of burrowing bivalves in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology*, 46(11), 1431–1446. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00771.x>
- [5] Geist, J. (2010). Strategies for the conservation of endangered freshwater pearl mussels (*Margaritifera margaritifera* L.): A synthesis of conservation genetics and ecology. *Hydrobiologia*, 644, 69–88. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0190-2>
- [6] Lopes-Lima, M., Sousa, R., Geist, J., Aldridge, D. C., Araujo, R., Bergengren, J., Bespalaya, Y., Bódis, E., Burlakova, L., Van Damme, D., Douda, K., Froufe, E., Georgiev, D., Gumpinger, C., Karatayev, A., Kebapçı, Ü., Killeen, I., Lajtner, J., Larsen, B. M., ... Zogaris, S. (2017). Conservation status of freshwater mussels in Europe: State of the art and future challenges. *Biological Reviews*, 92(1), 572–607. <https://doi.org/10.1111/brv.12244>
- [7] Zajac, K. (2010). 1032 Skójka gruboskorupowa *Unio crassus* Philipsson, 1788. In M. Makomaska-Juchiewicz (Ed.), *Monitoring gatunków zwierząt: Przewodnik metodyczny. Część pierwsza* (pp. 157–179). Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- [8] Stoeckl, K., & Geist, J. (2016). Hydrological and substrate requirements of the thick-shelled river mussel *Unio crassus* (Philipsson 1788). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(3), 456–469. <https://doi.org/10.1002/aqc.2598>
- [9] Stoeckl, K., Denic, M., & Geist, J. (2020). Conservation status of two endangered freshwater mussel species in Bavaria, Germany: Habitat quality, threats, and implications for conservation management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 30(4), 647–661. <https://doi.org/10.1002/aqc.3310>
- [10] Zettler, M. L., & Jueg, U. (2007). The situation of the freshwater mussel *Unio crassus* (Philipsson, 1788) in north-east Germany and its monitoring in terms of the EC Habitats Directive. *Mollusca*, 25(2), 165–174.
- [11] Denic, M., Stoeckl, K., Gum, B., & Geist, J. (2014). Physicochemical assessment of *Unio crassus* habitat quality in a small upland stream and implications for conservation. *Hydrobiologia*, 735(1), 111–122. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1467-z>
- [12] Hochwald, S. (2001). Plasticity of life-history traits in *Unio crassus*. In G. Bauer & K. Wächtler (Eds.), *Ecology and evolution of the freshwater mussels Unionoida* (pp. 127–141). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56869-5_7
- [13] Шевчук, Л. М., Васильєва, Л. А., Пампура, М. М., & Межжерін, С. В. (2019). Перлівниці (Unionidae) України: Ресурсна оцінка (чисельність, динаміка ареалів, особливості розмноження). *Вісник зоології*, 37(Спец. вип.), 1–92. URL: <http://mail.izan.kiev.ua/vz-pdf/suppl/s37.pdf>
- [14] Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2021). *Про затвердження переліків видів тварин, що заносяться до Червоної книги України (тваринний світ), та видів тварин, що виключені з Червоної книги України (тваринний світ): Наказ від 19.01.2021 № 29*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0260-21#n19>

- [15] Strayer, D. L., Downing, J. A., Haag, W. R., King, T. L., Layzer, J. B., Newton, T. J., & Nichols, S. J. (2004). Changing perspectives on pearly mussels, North America's most imperiled animals. *BioScience*, 54(5), 429–439. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0429:CPOPMN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0429:CPOPMN]2.0.CO;2)
- [16] Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Prentice Hall.
- [17] Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research* (3rd ed.). W. H. Freeman.
- [18] Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2006). *Ecology: From individuals to ecosystems* (4th ed.). Blackwell Publishing.
- [19] European Commission. (2017). *Reporting under Article 17 of the Habitats Directive: Explanatory notes and guidelines for the period 2013–2018*. URL: https://cdr.eionet.europa.eu/help/habitats_art17
- [20] Evans, D., & Arvela, M. (2011). *Assessment and reporting under Article 17 of the Habitats Directive: Explanatory notes and guidelines for the period 2007–2012*. European Topic Centre on Biological Diversity. URL: <https://www.eionet.europa.eu>

© Шевчук Л. М.

Дата надходження статті до редакції: 20.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0