УДК 598.2:574.4:551.583
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.42

ТЕРМІЧНА ЕКОЛОГІЧНА НІША ПТАХІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОЦІНЮВАННЯ КЛІМАТИЧНОЇ ВРАЗЛИВОСТІ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИРОДООХОРОННИХ РІШЕНЬ

Никитюк Ю.А. (orcid.org/0000-0001-9142-7699),
Вискушенко Д.А. (orcid.org/0000-0002-2747-9117),
Коморна О.М. (orcid.org/0000-0003-1498-0719)
Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир
andreyniks2@gmail.com

Глобальні зміни клімату є одним із провідних чинників трансформації структури біорізноманіття, що зумовлює необхідність удосконалення підходів до оцінювання чутливості видів до змін температурного режиму. Одним із перспективних напрямів є використання параметрів термічної екологічної ніші, які відображають особливості взаємодії виду з температурним середовищем і можуть слугувати інструментом інтегральної оцінки його потенційної реакції на кліматичні зміни.

Метою роботи є розроблення та методологічне обґрунтування інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші птахів для оцінювання термічно зумовленої складової їх кліматичної вразливості та визначення можливостей застосування отриманих результатів під час обґрунтування природоохоронних рішень.

Робота ґрунтується на результатах попередніх досліджень термічної екологічної ніші птахів Житомирської області та їх подальшій інтегральній екологічній інтерпретації. Основну увагу зосереджено на комплексному аналізі трьох взаємодоповнюючих параметрів термічної екологічної ніші (термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку) і їх використанні для оцінювання термічної спеціалізації видів.

Зазначено, що інтегральне використання відповідних параметрів забезпечує більш повну оцінку потенційної чутливості птахів до кліматичних змін порівняно з аналізом окремих температурних характеристик. Запропоновано концептуальну схему інтегральної оцінки термічної спеціалізації та здійснено екологічну інтерпретацію трьох узагальнених типів термічної спеціалізації птахів, які відрізняються прогнозованою реакцією на подальше потепління. Обґрунтовано доцільність використання інтегрального аналізу параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання кліматичної вразливості видів, прогнозування можливих змін структури орнітофауни та наукового обґрунтування природоохоронних рішень. *Ключові слова:* термічна екологічна ніша, птахи, глобальні зміни клімату, термічна спеціалізація, температурна толерантність, асиметрія температурного відгуку, кліматична вразливість, природоохоронні рішення.

Thermal ecological niche of birds as a tool for assessing climate vulnerability and supporting conservation decisions. Nykytiuk Yu., Vyskushenko D., Komorna O.

Climate change is one of the major drivers of biodiversity transformation, creating a need for improved approaches to assessing species sensitivity to changing thermal conditions. One promising approach is the use of thermal ecological niche parameters, which characterize the relationship between species and the thermal environment and can serve as a tool for the integrated assessment of their potential responses to climate change.

The aim of this study was to develop and provide a methodological justification for the integrated use of thermal ecological niche parameters to assess the thermally driven component of bird species' climate vulnerability and to determine the potential application of the obtained results in supporting conservation decisions.

The study builds upon previous investigations of the thermal ecological niche of birds in the Zhytomyr Region (Ukraine) and extends them through an integrated ecological interpretation. Particular attention is paid to the combined analysis of three complementary parameters of the thermal ecological niche (thermal optimum, thermal tolerance breadth, and asymmetry of the thermal response) and their application to the assessment of species' thermal specialization.

The results demonstrate that the integrated consideration of these parameters provides a more comprehensive assessment of birds' potential sensitivity to climate change than the analysis of individual thermal characteristics. A conceptual framework for the integrated assessment of thermal specialization is proposed, and three generalized types of thermal specialization differing in their predicted responses to future climate warming are ecologically interpreted. The proposed approach may be applied to the assessment of species' climate vulnerability, prediction of potential changes in avifaunal structure, and scientific support for biodiversity conservation and environmental decision-making. *Key words:* thermal ecological niche, birds, climate change, thermal specialization, thermal tolerance, thermal response asymmetry, climate vulnerability, conservation decisions.

Постановка проблеми. Глобальні зміни клімату належать до ключових чинників трансформації сучасного біорізноманіття. Підвищення температури повітря змінює умови існування видів, впливає на їх просторове поширення, сезонну активність, успішність розмноження та структуру угруповань.

© Никитюк Ю.А., Вискушенко Д.А., Коморна О.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Водночас реакція птахів на ці процеси є неоднаковою і визначається особливостями їх екологічної спеціалізації.

Одним із найбільш інформативних підходів до оцінювання такої реакції є аналіз термічної екологічної ніші, яка відображає температурні умови існування виду, межі його толерантності та характер екологічного відгуку на зміну температури. У цьому контексті чутливість розглядається як одна зі складових кліматичної вразливості виду, що характеризує особливості його реакції на зміну температурних умов, тоді як комплекс параметрів термічної екологічної ніші дає змогу оцінити саме термічно зумовлену складову такої вразливості [1]. Інтегральне врахування цих характеристик створює підґрунтя для обґрунтованого прогнозування можливих змін орнітофауни в умовах подальшого потепління. Незважаючи на значний розвиток кліматично орієнтованих досліджень, комплексне використання параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання вразливості птахів і досі залишається недостатньо розробленим, що й зумовило актуальність розроблення інтегрального підходу до оцінювання термічно зумовленої складової їх кліматичної вразливості.

Актуальність дослідження. Глобальні зміни клімату вже впливають на поширення видів, сезонні ритми та структуру біотичних угруповань, а подальше зростання температури посилюватиме ризики втрати придатних умов існування для частини наземної біоти [1]. За таких обставин особливого значення набуває не лише фіксація змін у складі й поширенні орнітофауни, а й завчасне визначення видів, потенційно найбільш чутливих до перебудови температурного режиму. Однією з інформативних основ такого оцінювання є термічна екологічна ніша, параметри якої відображають положення виду в температурному градієнті та широту прийнятних для нього умов. Дослідження показують, що характер сучасних змін ареалів птахів пов'язаний із шириною їхньої кліматичної ніші, однак використання лише одного її показника не дає змоги повною мірою врахувати відмінності між видами [2]. Тому актуальним є комплексне оцінювання термічного оптимуму, толерантності та асиметрії відгуку як взаємопов'язаних характеристик, здатних уточнити потенційну чутливість птахів до глобальних змін клімату.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлена стаття розвиває результати попередніх досліджень термічної екологічної ніші птахів та оцінювання наслідків глобальних змін клімату для орнітофауни [3]. У цій роботі основну увагу зосереджено на методологічному обґрунтуванні інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання термічно зумовленої складової кліматичної вразливості видів. Отримані результати можуть бути використані під час прогнозування змін біорізноманіття, удосконалення програм екологічного моніторингу та наукового обґрунтування природоохоронних заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Реакція орнітофауни на сучасні кліматичні зміни є одним із найбільш досліджуваних напрямів екології останніх років. Основна увага при цьому приділяється трансформації ареалів, змінам фенологічних характеристик, перебудові структури угруповань та адаптації видів до нових температурних умов. Результати багаторічних спостережень за птахами Північної Америки свідчать, що пристосування до потепління значною мірою відбувається завдяки зміщенню строків розмноження, тоді як просторові переміщення відіграють менш помітну роль [4]. Водночас результати масштабного аналізу просторової динаміки 378 видів європейських птахів показали, що локальні колонізації та зникнення значною мірою визначаються не лише зміною кліматичної придатності територій, а й комплексом екологічних чинників та видових особливостей [5]. Таким чином, сучасні дослідження переконливо демонструють складний і багатофакторний характер реакції птахів на зміну клімату.

Одним із найбільш перспективних напрямів аналізу таких процесів є використання концепції кліматичної екологічної ніші. Її параметри характеризують не лише положення виду вздовж температурного градієнта, а й межі умов, у яких можливе його тривале існування. Особливий інтерес викликає ширина кліматичної ніші, оскільки саме вона значною мірою визначає потенційну екологічну пластичність видів. Доведено, що птахи з вузькою кліматичною нішею демонструють виразніші зміни просторового поширення в умовах сучасного потепління порівняно з видами широкої кліматичної спеціалізації [2]. На глобальному рівні ширина кліматичної ніші також пов'язана з міграційною поведінкою, положенням виду у кліматичному просторі та його функціональними характеристиками [6]. Це свідчить про те, що параметри кліматичної ніші відображають фундаментальні екологічні властивості виду, а не лише особливості його сучасного поширення.

Попри активний розвиток біокліматичного моделювання, більшість досліджень використовує характеристики кліматичної ніші переважно для прогнозування можливих змін ареалів. Значно рідше вони розглядаються як самостійний інструмент оцінювання екологічної чутливості видів до зміни температурного режиму. Водночас зміни середніх температурних характеристик угруповань уже застосовують для аналізу довготривалих трансформацій орнітофауни. Показано, що функціонально різноманітні угруповання можуть характеризуватися меншою мінливістю середньої термічної ніші, хоча прояв цього взаємозв'язку залежить від сезону спостережень [7]. Крім того, результати палеоекологічних реконструкцій засвідчили, що холодолюбні види реагували на

кліматичні коливання істотно сильніше, ніж птахи, пов'язані з помірнішими температурними умовами [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Наявні дослідження підтверджують інформативність термічного оптимуму та ширини толерантності для характеристики кліматичної приуроченості птахів. Водночас ці параметри найчастіше аналізують окремо або використовують переважно для групування видів і прогнозування просторових змін їхніх ареалів. Такий підхід не повністю враховує форму відгуку виду вздовж температурного градієнта. Зокрема, близькі значення оптимуму можуть поєднуватися з неоднаковою толерантністю, а подібна ширина термічної ніші – з різним напрямом та ступенем асиметрії реакції.

Недостатньо опрацьованим залишається комплексне співвіднесення термічного оптимуму, ширини толерантності й асиметрії відгуку як взаємопов'язаних характеристик екологічної ніші. Не визначено повною мірою й те, наскільки їх спільне використання дає змогу диференціювати види за потенційною чутливістю до зміни температурного режиму. Розв'язання цієї частини проблеми потребує переходу від оцінювання окремих показників до інтегрованого аналізу їх поєднань, що може уточнити екологічну інтерпретацію реакції птахів на глобальні зміни клімату.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у методологічному обґрунтуванні інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання термічно зумовленої складової кліматичної вразливості птахів. На відміну від попередніх досліджень, у яких основну увагу було зосереджено на кількісному визначенні параметрів термічної ніші та класифікації видів, у роботі запропоновано підхід до їх комплексної екологічної інтерпретації на основі поєднання термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку. Це дало змогу розглядати термічну спеціалізацію як інтегральну характеристику потенційної чутливості видів до кліматичних змін і запропонувати концептуальну схему її використання для екологічного обґрунтування прогнозних та природоохоронних рішень.

Методологічне та загальнонаукове значення. Запропонований підхід розвиває методичні можливості оцінювання кліматичної чутливості птахів шляхом комплексного аналізу параметрів термічної екологічної ніші та може бути використаний під час дослідження інших таксономічних груп організмів. У загальнонауковому аспекті результати роботи сприяють удосконаленню кількісних підходів до аналізу екологічних систем і відповідають сучасним тенденціям розвитку методології екологічних досліджень, спрямованої на інтеграцію екологічних показників у систему наукового обґрунтування природоохоронних рішень [9].

Викладення основного матеріалу. Глобальні зміни клімату неоднаково впливають на різні види птахів, що зумовлено особливостями їх екологічної спеціалізації. Тому оцінювання потенційної реакції орнітофауни доцільно ґрунтувати не лише на аналізі сучасного поширення видів або окремих кліматичних показників, а й на характеристиках, які відображають особливості взаємодії видів з температурним середовищем. Однією з таких характеристик є термічна екологічна ніша [2, 6].

Методичною основою роботи стали результати попереднього дослідження термічної екологічної ніші птахів Житомирської області [3], у межах якого параметри реакції видів на градієнт середньорічної температури визначали за допомогою β-функції, а екологічні групи виокремлювали методом кластерного аналізу Варда. У цій роботі зазначені результати використано для інтегральної екологічної інтерпретації термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку, яку в базовому дослідженні кількісно описували показником форми кривої (куртозисом).

Термічна екологічна ніша характеризує положення виду в температурному градієнті та визначає межі умов, у яких забезпечується його стале існування. Інтегральний підхід ґрунтується на використанні трьох взаємодоповнювальних параметрів термічної екологічної ніші: термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку. Термічний оптимум визначає найбільш сприятливі температурні умови для виду, ширина толерантності характеризує діапазон прийнятних температур, а асиметрія показує особливості реакції виду на відхилення від оптимальних умов.

Кожен із наведених показників має самостійне екологічне значення, проте їх ізольоване використання не дозволяє повною мірою оцінити потенційну чутливість видів до кліматичних змін. Види зі схожим температурним оптимумом можуть істотно відрізнятися шириною толерантності, тоді як подібна толерантність не завжди супроводжується однаковою реакцією на підвищення або зниження температури. Тому оцінювання термічної спеціалізації повинно базуватися на інтегральному аналізі всіх параметрів термічної екологічної ніші [2, 6].

Такий підхід забезпечує перехід від опису окремих температурних характеристик до комплексної оцінки екологічної стратегії виду. Поєднання термічного оптимуму, ширини толерантності та асиметрії відгуку створює основу для порівняння видів між собою, визначення рівня їх термічної спеціалізації та прогнозування потенційної реакції на подальшу трансформацію кліматичних умов. Концептуальну схему такого підходу наведено на рис. 1.

Запропонована схема ілюструє послідовність переходу від окремих параметрів термічної екологічної ніші до інтегральної оцінки екологічної спеці-



Рис. 1. Концептуальна схема інтегральної оцінки термічної спеціалізації птахів для прогнозування їх реакції на зміну клімату

алізації виду. Її принциповою особливістю є розгляд термічного оптимуму, ширини толерантності та асиметрії температурного відгуку як взаємопов'язаних параметрів, екологічне значення яких проявляється лише в їх комплексному поєднанні. Це дає змогу уникнути спрощених висновків, характерних для аналізу кожного показника окремо.

Подібність видів за одним із параметрів термічної екологічної ніші ще не означає подібності їх екологічних властивостей [2]. Наприклад, однаковий термічний оптимум може поєднуватися як із широкою, так і з вузькою температурною толерантністю, тоді як схожі межі толерантності не завжди супроводжуються однаковою реакцією на підвищення температури. Саме тому інтегральний аналіз усіх параметрів термічної екологічної ніші дозволив перейти від порівняння окремих показників до оцінювання загальної подібності видів, виділення груп із близькими особливостями термічної спеціалізації та їх екологічного узагальнення.

В основу виділення груп покладено результати кластерного аналізу, отримані в попередніх дослідженнях [3], які використано для їх подальшої інтегральної екологічної інтерпретації. На відміну від традиційного порівняння окремих показників, кластеризація дала можливість виявити типові поєднання характеристик, що відображають різні варіанти термічної спеціалізації видів. У результаті було виокремлено три основні екологічні групи, які відрізняються рівнем термічної спеціалізації та потенційною реакцією на подальшу зміну клімату [3]. Виділені групи слід розглядати не як жорсткі таксономічні категорії, а як узагальнені типи термічної спеціалізації, що відображають подібність екологічних стратегій видів.

Серед виділених екологічних груп найбільш сприятливий прогноз в умовах подальшого підвищення температури характерний для стенотопних мегатермів. До цієї групи належать, зокрема, одуд (*Upupa epops*), лелека білий (*Ciconia ciconia*) та журавель сірий (*Grus grus*). Незважаючи на відносно вузьку температурну толерантність, представники цієї групи характеризуються високим термічним оптимумом, що відповідає сучасному напряму кліматичних змін. За таких умов саме положення оптимуму набуває визначального значення, тоді як обмежена ширина термічної ніші не нівелює загалом сприятливого прогнозу для цієї групи. Для більшості її представників асиметрія температурного відгуку не змінює загальної спрямованості прогнозу, проте уточнює характер їх реакції поблизу верхніх меж температурної толерантності.

Отже, для стенотопних мегатермів прогнозовані кліматичні зміни загалом є сприятливими, що визначається саме інтегральною конфігурацією термічної ніші, а не окремими її параметрами.

Інший варіант термічної спеціалізації представлений евритопними мезотермами. На відміну від попередньої групи, їх характеризує не зміщення термічного оптимуму до високих температур, а поєднання помірних оптимальних умов існування з широким діапазоном температурної толерантності. Саме ця

особливість зменшує залежність видів від окремих температурних коливань.

Екологічне значення цієї групи полягає насамперед у високій екологічній пластичності, що забезпечує відносну стійкість видів у широкому спектрі температурних умов. Порівняння зі стенотопними мегатермами показує, що подібний рівень потенційної стійкості може досягатися різними шляхами. Якщо для стенотопних мегатермів вирішальним чинником є високий термічний оптимум, то для евритопних мезотерм – широка температурна толерантність. Це підтверджує, що оцінювання реакції видів на кліматичні зміни повинно ґрунтуватися на комплексному аналізі структури термічної екологічної ніші.

Третю групу формують стенотопні мікротерми, для яких прогнозована реакція на подальше підвищення температури є найменш сприятливою. Характерними представниками цієї групи є орябок (*Tetrastes bonasia*), сич волохатий (*Aegolius funereus*) та жовна сива (*Picus canus*). На відміну від мегатермів, їх термічний оптимум зміщений у бік нижчих температур, а вузька температурна толерантність підвищує чутливість до змін температурного режиму.

Саме ця група найбільшою мірою відображає потенційні ризики, пов'язані зі зміною клімату. Поєднання низького термічного оптимуму, вузької температурної толерантності та особливостей асиметрії температурного відгуку формує тип термічної спеціалізації, що характеризується найвищою прогнозованою вразливістю до потепління. Це дає змогу розглядати стенотопних мікротермів як пріоритетний об'єкт подальшого екологічного моніторингу.

Порівняння трьох виділених груп показує, що прогнозована реакція птахів на кліматичні зміни визначається не окремими параметрами термічної екологічної ніші, а характером їх поєднання. Інтегральний аналіз дає змогу виявити різні типи термічної спеціалізації та пояснити відмінності у потенційній стійкості видів до подальшого потепління.

Узагальнену характеристику виділених екологічних груп наведено в табл. 1. Їх екологічна інтерпретація ґрунтується на комплексному врахуванні термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку.

Головні висновки. У роботі обґрунтовано доцільність інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші для характеристики чутливості птахів до зміни температурних умов та оцінювання термічно зумовленої складової їх кліматичної вразливості. Показано, що найбільш інформативним є комплексний аналіз термічного оптимуму, ширини толерантності та асиметрії температурного відгуку, тоді як ізольоване використання окремих показників не забезпечує достатньо повної екологічної інтерпретації.

Потенційна реакція видів визначається насамперед поєднанням параметрів термічної екологічної ніші. Запропонований підхід дав змогу виокремити екологічні групи, які відрізняються рівнем термічної спеціалізації та прогнозованою чутливістю до потепління.

Найсприятливіші перспективи в умовах сучасних кліматичних змін мають стенотопні мегатерми, тоді як найвища прогнозована вразливість до потепління характерна для стенотопних мікротермів. Евритопні мезотерми характеризуються найвищою екологічною пластичністю, що забезпечує їм відносну стійкість у широкому діапазоні температурних умов.

Запропонований підхід може бути використаний для прогнозування змін орнітофауни, оцінювання кліматичної вразливості видів та наукового обґрунтування природоохоронних рішень.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку підходів до оцінювання кліматичної вразливості орнітофауни на основі інтегрального аналізу параметрів термічної екологічної ніші. Перспективними напрямами

Таблиця 1

Інтегральна характеристика основних типів термічної спеціалізації птахів та їх прогнозованої реакції на зміну клімату

Екологічна група	Домінуюча конфігурація термічної ніші	Прогнозована реакція	Екологічна інтерпретація
Стенотопні мегатерми	Високий оптимум, вузька толерантність; асиметрія уточнює видоспецифічну реакцію	Переважно сприятлива	Сприятливий прогноз визначається відповідністю оптимуму напряму потепління
Евритопні мезотерми	Помірний оптимум, широка толерантність; найбільш виражена мінливість форми відгуку	Відносно стабільна	Широка температурна толерантність забезпечує відносну стійкість
Стенотопні мікротерми	Низький оптимум, вузька толерантність; форма відгуку уточнює ступінь ризику	Найбільш несприятлива	Поєднання холодолюбності та вузької толерантності зумовлює підвищену чутливість до потепління

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

є апробація запропонованого підходу в інших регіонах України, його адаптація для різних таксономічних груп тварин, а також інтеграція показників термічної спеціалізації з характеристиками оселищ, землекористування та сценаріями регіональних кліматичних змін. Це сприятиме підвищенню обґрунтованості прогнозів трансформації біорізноманіття, удосконаленню системи екологічного моніторингу та підтримці прийняття природоохоронних і управлінських рішень.

Література

1. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. URL:https://doi.org/10.1017/9781009325844
2. Hällfors M. H., Heikkinen R. K., Kuussaari M., Lehikoinen A., Luoto M., Pöyry J., Virkkala R., Saastamoinen M., Kujala H. Recent range shifts of moths, butterflies, and birds are driven by the breadth of their climatic niche. *Evolution Letters*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 89–100. URL: https://doi.org/10.1093/evlett/qrad004.
3. Tkachuk R., Nykytiuk Y., Komorna O., Kravchenko O., Zymaroieva A. Ecological groups of birds of Zhytomyr region (Ukraine) in relation to thermal regime and their future prospects in the context of global climate change. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32, No. 4. P. 510–521. URL: https://doi.org/10.15421/012432.
4. Neate-Clegg M. H. C., Tonelli B. A., Tingley M. W. Advances in breeding phenology outpace latitudinal and elevational shifts for North American birds tracking temperature. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. 8. P. 2027-2036. URL:https://doi.org/10.1038/s41559-024-02536-z.
5. Howard C., Marjakangas E.-L., Morán-Ordóñez A. et al. Local colonisations and extinctions of European birds are poorly explained by changes in climate suitability. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Article 4304. URL:https://doi.org/10.1038/s41467-023-39093-1.
6. Rodrigues J. F. M., Botero C. A. The global determinants of climate niche breadth in birds. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. Article 3685. URL:https://doi.org/10.1038/s41467-025-58815-1.
7. Marjakangas E.-L., Santangeli A., Johnston A., Michel N. L., Princé K., Lehikoinen A. Effects of diversity on thermal niche variation in bird communities under climate change. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 21810. URL:https://doi.org/10.1038/s41598-022-26248-1.
8. Carrera L., Pavia M., Varela S. Birds adapted to cold conditions show greater changes in range size related to past climatic oscillations than temperate birds. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 10813. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-022-14972-7.
9. 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. URL: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.1.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026