

Reflectance characteristics of flowers as a criterion for invasiveness of *Erigeron annuus* (L.) Pers.

V. S. Fedenko

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Article info

Received 23.03.2024

Received in revised form
25.04.2024

Accepted 03.05.2024

Oles Honchar Dnipro National
University, Nauky Ave., 72,
Dnipro, 49010, Ukraine.

E-mail:

opticlab.fedenko@gmail.com

Fedenko, V. S. (2024). Reflectance characteristics of flowers as a criterion for invasiveness of *Erigeron annuus* (L.) Pers. *Ecology and Noospherology*, 35(1), 52–57. doi:10.15421/032409

The invasiveness of alien plants is determined by a complex of functional features, among which the impact of phytointerventions on the relationships between native plants and pollinators is noted. Flowers of invasive plants are characterized by increased attractiveness to pollinators, which ensures significant seed production, population growth and expansion. To explain such a trend, it is necessary to identify the differences in the flowers of invasive plants. The results of a comparative study of the reflectance spectra and colorimetry of flowers of the invasive species *Erigeron annuus* (L.) Pers. (annual fleabane) and the native species *Achillea submillefolium* Klok et Krytzka (almost common yarrow) are presented. Selection of border flowers with white color of co-flowering plants was carried out in the recreation area of Botanical Garden of Oles Honchar Dnipro National University. It was established that the defining feature of the reflectance spectra of *E. annuus* flowers compared to *A. submillefolium* flowers is an increase in the maximum intensity of UV-absorbing flavonoids in surface tissues. The identified feature corresponds to the maximum sensitivity of the UV photoreceptor of such a common pollinator as *Apis mellifera* L. The characteristics of the differential reflectance spectrum of flowers of co-flowering plants were determined as markers of the color contrast between invasive and native species and an attractive signal for the pollinator's UV receptor. The flowers of the studied plants were also characterized by a specific set of colorimetric parameters. According to the data of differential colorimetry, the relative contribution to the integral value of the color difference of the flowers of the compared species was established for the component differences in lightness and chroma. In addition to attractiveness, the light-absorbing properties of flavonoids provide another important function – photoprotective. In the flowers of *E. annuus*, apigenin, luteolin and their glycosides predominate among flavonoids, for which the presence of two bands with high absorption capacity can provide a significant protective capacity against UV-A and UV-B radiation. Therefore, the increased localization of UV-absorbing flavonoids in the surface tissues of flowers of invasive plants may mean a simultaneous increase in attractiveness and photoprotective ability compared to native species. Such a tendency should be considered as an adaptive strengthening of the reproductive system of an invasive species. The obtained results confirm the role of phenolic compounds in increasing the competitiveness of invasive plants according to the shifting defense hypothesis. Since the biomass of *E. annuus* is distinguished by a high content of biologically active phenolic compounds, the reflectance spectroscopy in the visible range and colorimetry used by us can be applied to the development of the modern direction – the expansion of the raw material base of medicinal plants due to the use of invasive species.

Keywords: *Erigeron annuus* (L.) Pers.; *Achillea submillefolium* Klok et Krytzka; invasiveness; flowers; flavonoids; reflectance spectra; colorimetry.

Відбивальні характеристики квіток як критерій інвазивності *Erigeron annuus* (L.) Pers.

В. С. Феденко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

Інвазивність чужорідних рослин визначається комплексом функціональних ознак, серед яких відзначають вплив фітоінвазій на взаємозв'язки нативних рослин із запилювачами. Для квіток інвазійних рослин характерно збільшення атрактивності для запилювачів, що забезпечує значну насіннєву продуктивність, приріст популяції та експансію. Для пояснення такої тенденції необхідно виявлення відмінностей квіток інвазійних рослин. Представлено результати порівняльного дослідження спектрів відбиття і колориметрії квіток інвазійного виду *Erigeron annuus* (L.) Pers. (злінка однорічна) і нативного виду *Achillea submillefolium* Klokov et Krytzka (деревій майже звичайний). Відбір крайових квіток із білим забарвленням спільно квітучих рослин проводили у рекреаційній зоні ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Установлено, що визначальною особливістю спектрів відбиття квіток *E. annuus* порівняно із квітками *A. submillefolium* є підвищення інтенсивності максимуму УФ-поглинальних флавоноїдів у поверхневих тканинах. Виявлена особливість відповідає максимуму чутливості УФ-фоторецептора такого поширеного запилювача, як *Apis mellifera* L. Визначено характеристики диференційного спектру відбиття квіток спільно квітучих рослин як маркерні ознаки кольорового контрасту між інвазійним і нативним видом та атрактивний сигнал для УФ-рецептора запилювача. Квітки досліджених рослин також охарактеризовано специфічною сукупністю колориметричних параметрів. За даними диференційної колориметрії зіставний внесок в інтегральну величину колірної відмінності квіток порівнюваних видів встановлено для складових відмінностей за яскравістю і кольоровістю. Окрім атрактивності, світлопоглинальні властивості флавоноїдів забезпечують іншу важливу функцію – фотопротекторну. У квітках *E. annuus* серед флавоноїдів переважають апігенін, лютеолін та їх глікозиди, для яких наявність двох смуг із високою поглинальною здатністю може забезпечити значну протекторну здатність відносно УФ-А та УФ-В радіації. Тому підвищена локалізація флавоноїдів, що поглинають ультрафіолет, у поверхневих тканинах квіток інвазійних рослин може означати одночасне підвищення атрактивної та фотопротекторної здатності порівняно із нативними видами. Таку тенденцію слід розглядати як адаптивне підсилення репродуктивної системи інвазійного виду. Отримані результати підтверджують роль фенольних сполук у підвищенні конкурентноспроможності інвазійних рослин згідно з гіпотезою зміни захисту (shifting defence hypothesis). Оскільки біомаса *E. annuus* відрізняється високим умістом біологічно активних фенольних сполук, використані нами спектроскопія відбиття у видимому діапазоні та колориметрія можуть бути застосовані для розвитку сучасного напрямку – розширення сировинної бази лікарських рослин за рахунок використання інвазійних видів.

Ключові слова: *Erigeron annuus* (L.) Pers.; *Achillea submillefolium* Klokov et Krytzka; інвазивність; квітки; флавоноїди; спектри відбиття; колориметрія.

Вступ

Інвазивність чужорідних рослин визначається комплексом функціональних ознак, які обумовлюють поширення адвентів та їх загрозу для біорізноманіття (Gioria et al., 2023). Серед цих функціональних ознак відзначають вплив фітоінвазій на взаємозв'язки нативних рослин із запилювачами (Parra-Tabla, Arceo-Gómez, 2021). Для квіток інвазійних рослин характерне збільшення атрактивності для запилювачів із підвищенням їх кількості та частоти візитів, що забезпечує значну насіннєву продуктивність, приріст популяції, експансію чужорідних видів та зміну флористичного складу біотопів (Parra-Tabla, Arceo-Gómez, 2021).

Взаємодія ентомофільних рослин із запилювачами як фактор репродуктивного успіху включає два аспекти. Перший аспект – кольоровий поліхромізм квіток, що реалізується за рахунок накопичення в поверхневих тканинах різного типу пігментів (хлорофіли, каротиноїди, флавоноїди, беталаїни), які створюють відповідні кольорові стимули у результаті селективного поглинання сонячного випромінювання (Fedenko, 2002; Narbona et al., 2021). Другий аспект – здатність запилювачів розрізняти кольорові стимули квіток відповідно до фізіологічних особливостей аналізатора зору. Для таких поширених запилювачів, як медоносні бджоли (*Apis mellifera* L.), характерні три фоторецептори, які чутливі до УФ, синього та зеленого світла (Brunet, Minahan, 2024). У візуальній моделі бджіл максимальна чутливість встановлена для УФ-рецептора, якому відповідають білі квітки з УФ-поглинальними флавоноїдами, що створюють найвищий ахроматичний контраст на зеленому фоні листків (Narbona et al., 2021). У зв'язку з цим для з'ясування найбільш контрастних відмінностей у відносинах рослина–запилювач доцільно проводити порівняльний аналіз білокіткових інвазійних і нативних видів, для яких у поверхневих тканинах квіток переважають УФ-поглинальні флавоноїди, що створюють кольоровий стимул для максимально чутливого УФ-фоторецептора запилювачів.

Для дослідження впливу інвазійних видів на біотичні зв'язки у системі рослина–запилювач використовують угруповання спільно квітучих рослин (квіткові модулі) із

однаковим кольором (Suarez-Marino et al., 2022). Як приклад такого порівняльного дослідження можуть бути білокіткові види ентомофільних рослин родини Asteraceae: інвазійний *Erigeron annuus* (L.) Pers. (злінка однорічна) та нативний *Achillea submillefolium* Klokov et Krytzka (деревій майже звичайний) (Warzecha et al., 2018; Szigeti et al., 2023). Порівняльний аналіз атрактивності квіток цих видів у процесі запилення проведено в попередніх дослідженнях (Wäckers, 2004). *E. annuus* – інвазійний вид із високою активністю в процесі адвентизації флори України (Zavialova et al., 2021). Інвазії злінки однорічної повністю змінюють структуру рослинних угруповань, оскільки експансії цього виду сприяють такі фактори: евритопіність, висока насіннєва продуктивність, тривалі терміни вегетації та плодonoшення, ефективні способи розповсюдження насіння, яке здатне впливати на інші види рослин при проростанні за допомогою алелопатично активних речовин (Del Fabbro et al., 2014). Нативний вид *A. submillefolium* – типовий представник флори північного степу Придніпров'я (Baranovski et al., 2023), а траву і квітки цієї рослини використовують як лікарську сировину (Smoylovska et al., 2021).

Для виявлення відмінностей квіток інвазійних рослин використовують методичний підхід, який включає вимірювання спектрів відбиття із наступним перетворенням отриманих результатів за спеціальним алгоритмом на відповідні значення збудження трьох фоторецепторів згідно з моделлю кольорового зору запилювачів (Makino, Yokoyama, 2015; Sooraj et al., 2019). Із використанням такого підходу підтверджено, що найсуттєвіші відмінності для квіток інвазійних рослин із пігментами різного типу спостерігаються для діапазону 350–400 нм, який відповідає УФ-фоторецептору запилювача із максимальною чутливістю (Makino, Yokoyama, 2015; Sooraj et al., 2019). Разом з тим дослідження залежності коефіцієнта відбиття квіток від довжини хвилі не виявило маркерних ознак для диференціації інвазійних і нативних рослин. Слід припустити, що більш інформативним у цьому випадку може бути перетворення коефіцієнта відбиття у відповідні значення оптичної густини. Із використанням такого прийому можливо отримати структуровані спектральні

криві та визначити тип пігменту *in vivo* аналогічно ідентифікації за спектрами поглинання *in vitro*. Раніше такий підхід нами застосовано для виявлення типів забарвлення квіток у різних родинах покритонасінних рослин за сукупністю показників колориметрії, спектрів відбиття та поглинання (Fedenko, 2002, 2022).

Мета – провести порівняльний аналіз спектральних характеристик спільно квітучих білокріткових рослин *E. annuus* та *A. submillefolium*.

Матеріали та методи досліджень

За об'єкт порівняльного дослідження обрано два представники родини Asteraceae – інвазійний вид злинка однорічна *Erigeron annuus* (L.) Pers. (стенактис однорічний *Stenactis annua* (L.) Cass. ex Less., *Phalacroloma annuum* (L.) Dumort., *Aster annuus* L.) (Mosyakin, 2023) та нативний вид деревій майже звичайний *Achillea submillefolium* Klokova et Krytzka. Відбір крайових квіток із білим забарвленням спільно квітучих рослин проводили в липні 2023 р. у рекреаційній зоні ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (парк ім. Ю. Гагаріна). За показниками частоти трапляння, проєктивного покриття та фітоценологічної активності *E. annuus* – один з інвазійних видів, який загрожує біорізноманіттю в рослинному покриві парку (Lisovets, Udzmadzhuridze, 2022).

Аналогічні умови вимірювання відбивальних та колориметричних параметрів квіток створювали за рахунок користування стандартним тримачем твердих зразків до спектрофотометру за умови повного покриття поверхні (діаметр 2 см).

Спектри відбиття квіток отримували в діапазоні 350–800 нм на спектрофотометрі Specord M40 (Німеччина), додатково обладнаному приставкою з фотометричною кулею і касетою «Data Handling I» для математичної обробки результатів вимірювання, що дозволило проводити згладжування спектральних кривих із виключенням випадкових шумових піків (Fedenko, Struzhko, 1998). Корекцію 100%-ї лінії проводили за стандартом MgO, оптичної нульової точки – за стандартом чорного порожнистого тіла. Інтенсивність спектрів відбиття наводили в одиницях абсорбції. Диференційний спектр обчислювали за різницею абсорбції ΔA при відповідній довжині хвилі у спектрах відбиття квіток *E. annuus* та *A. submillefolium* за рекомендаціями Fedenko (2007).

Для колориметричних вимірювань використовували спектрофотометр Specord M 40 з іншою касетою для математичної обробки «Color Measurement». Координати кольору (X , Y , Z) та координати кольоровості (x , y) визначали в системі CIE XYZ. Домінуючу довжину хвилі λ_d та умовну чистоту кольорового тону P_e встановлювали графічним способом за координатами зразків у кольоровому просторі (Fedenko, Struzhko, 1998). У колориметричній системі CIE $L^*a^*b^*$ визначали інтегральний коефіцієнт яскравості L^* та колориметричні коефіцієнти a^* (співвідношення зеленої і червоної складових кольору) і b^* (співвідношення синьої та жовтої складових кольору). Ігноруючись на значеннях колориметричних коефіцієнтів, обчислювали повну колірну відмінність ΔE^* між квітками *E. annuus* та *A. submillefolium*, а також розподіл цієї інтегральної величини на складові відмінності за яскравістю ΔL^* , кольоровістю ΔC^* та кольоровим тоном ΔH^* (Fedenko, 2022).

Похибка вимірювань спектральних параметрів не перевищувала 5 %. Статистичну обробку експериментальних даних проводили з 5 % рівнем значущості.

Результати та їх обговорення

У спектрах відбиття квіток обох досліджених видів спостерігались аналогічні за положенням максимуми при

359 (λ_1), 485 (λ_2) і 677 нм (λ_3) (рис. 1). Інтенсивний короткохвильовий максимум λ_1 обумовлено УФ-поглинальними флавоноїдами, які ідентифіковано у квітках *E. annuus* (Yoo et al., 2008) та *A. submillefolium* (Smoylovska et al., 2021). Схожість прояву максимуму λ_1 для квіток обох рослин пояснюється тим фактом, що серед флавоноїдів переважають флавори із однаковою хромофорною системою (апігенін, лютеолін та їх глікозиди) (Yoo et al., 2008; Smoylovska et al., 2021; Radušienė et al., 2023). Наявність максимумів λ_2 і λ_3 пов'язано із міноюю кількістю каротиноїдів і хлорофілів. За однакового положення максимумів їх інтенсивність (A_1 , A_2 і A_3) у спектрах відбиття квіток інвазійного і нативного видів розрізнялась (табл. 1). Окрім цих показників, для порівняльної характеристики спектральних кривих використано співвідношення оптичної густини короткохвильового максимуму A_1 як визначального для УФ-рецептора запилювача та оптичної густини мінорних максимумів A_2 і A_3 (A_1/A_2 , A_1/A_3) (табл. 1). Для зіставлення розраховані також співвідношення цих показників для квіток інвазійного та нативного виду (табл. 1).

Таблиця 1

Інтенсивність максимумів у спектрах відбиття квіток *Erigeron annuus* і *Achillea submillefolium*

Показник	<i>Erigeron annuus</i>	<i>Achillea submillefolium</i>	Співвідношення
A_1	1,02	0,83	1,23
A_2	0,31	0,39	0,79
A_3	0,26	0,31	0,84
A_1/A_2	3,29	2,13	1,54
A_1/A_3	3,92	2,68	1,46

Аналізуючи результати, слід зазначити, що визначальною особливістю відбивальних характеристик квіток *E. annuus* є підвищення на 23 % інтенсивності максимуму УФ-поглинальних флавоноїдів при 359 нм (для порівняння – максимум чутливості УФ-фоторецептора таких поширених запилювачів, як медоносні бджоли, становить 344 нм (Brunet, Minahan, 2024)). Інша особливість квіток інвазійного виду – зниження інтенсивності мінорних максимумів каротиноїдів і хлорофілів. Зазначені особливості призвели до підвищення співвідношень A_1/A_2 і A_1/A_3 на 54 і 46 % відповідно для *E. annuus*, що може свідчити про більшу ступінь кольорового контрасту для запилювачів (Narbona et al., 2021).

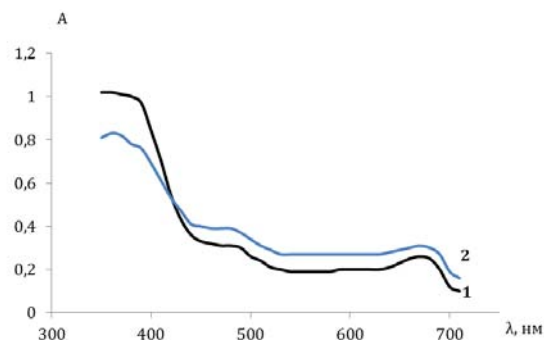


Рис. 1. Спектри відбиття квіток *Erigeron annuus* (1) і *Achillea submillefolium* (2)

Для підтвердження відмінностей відбивальних характеристик квіток інвазійного і нативного видів додатково використано методичний прийом диференційної спектрофотометрії. У результаті розрахунку різниці між спектральними кривими квіток *E. annuus* і *A. submillefolium* отримано диференційний спектр, у якому встановлено підвищення інтенсивності відбиття у діапазоні 350–410 нм

і наявність максимуму при 380 нм (рис. 2). Цей факт підтвердив, що основним чинником, який створює відмінність інвазійного виду порівняно із нативним, є підвищена акумуляція УФ-поглинальних флавоноїдів у поверхневих тканинах квіток, що підсилює їх атрактивність. Параметри диференційного спектру відбиття квіток спільно квітучих рослин слід розглядати як маркерні ознаки кольорового контрасту між інвазійним і нативним видами, а також як атрактивний сигнал для УФ-рецептора запилювача.

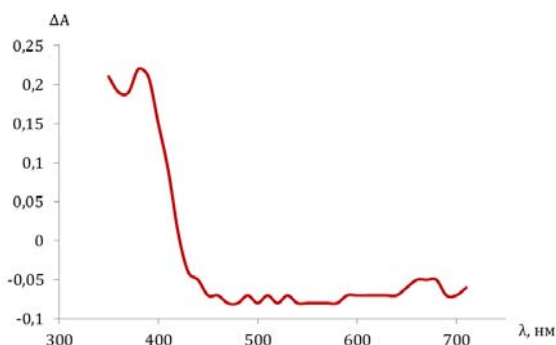


Рис. 2. Диференційний спектр відбиття квіток *Erigeron annuus* відносно квіток *Achillea submillefolium*

Додаткові характеристики квіток отримано в результаті перетворення спектрального розподілу інтенсивності відбиття залежно від довжини хвилі у відповідні колориметричні параметри (табл. 2). Мінорний уміст каротиноїдів і хлорофілів обумовив стимул квіток обох рослин у діапазоні жовтого кольору із близькими значеннями домінувальної довжини хвилі λ_d (табл. 2). Більш значна інтенсивність максимумів цих пігментів у спектрах відбиття квіток *A. submillefolium* (рис. 1) позначилась на підвищенні умовної чистоти кольорового тону P_e та зниженні інтегрального коефіцієнта яскравості L^* (табл. 2). У рівноконтрастній колориметричній системі досліджені квітки характеризувались специфічною сукупністю колориметричних коефіцієнтів (табл. 2).

Таблиця 2

Колориметричні характеристики квіток *Erigeron annuus* і *Achillea submillefolium*

Колориметричний параметр	<i>Erigeron annuus</i>	<i>Achillea submillefolium</i>
λ_d , нм	577,0	577,9
P_e , %	16,31	21,68
L^*	91,12	78,71
a^*	-15,24	-12,87
b^*	-56,23	-44,02

Використовуючи прийом диференційної колориметрії, розраховано кольорові відмінності квіток інвазійного і нативного видів (рис. 3). При цьому встановлено зіставний внесок в інтегральну величину ΔE^* складових відмінностей за яскравістю ΔL^* і кольоровістю ΔC^* .

Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що встановлені нами відмінності відбивальних характеристик квіток інвазійного виду *E. annuus* обумовлені підвищеним умістом УФ-поглинальних флавоноїдів у поверхневих тканинах, що відповідає максимально чутливому УФ-рецептору запилювачів. Така тенденція підвищує атрактивність квіток у процесі запилення і забезпечує репродуктивну ефективність фітоінвазій порівняно із нативними видами рослин. На відміну від існуючого методичного підходу (Makino, Yokoyama, 2015; Sooraj et al., 2019), нами запропоновано маркерні ознаки інвазійного виду: підвищена інтенсивність максимуму УФ-

поглинальних флавоноїдів у спектрі відбиття квіток та параметри диференційного спектру відносно квіток нативного виду. Запропонований методичний підхід має перспективу застосування для подальшого підтвердження ефективності спектральної стратегії інвазійних рослин (Sooraj et al., 2019).

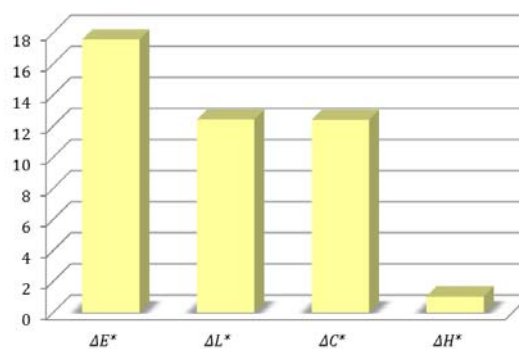


Рис. 3. Колірні відмінності квіток *Erigeron annuus* відносно квіток *Achillea submillefolium*

Окрім атрактивної функції, світлопоглинальні властивості флавоноїдів забезпечують також у рослинах іншу важливу функцію – фотопротекторну, оскільки функціонують як світлофільтри шляхом поглинання фотонів УФ-радіації (Ferreira, et al., 2021). Підтвердження фотопротекторного ефекту можливо здійснити, використовуючи цифрову базу даних спектрів поглинання флавоноїдів (Taniguchi et al., 2023). Слід зазначити, що ступінь захисту від сонячної УФ-радіації залежить від положення смуг у спектрі поглинання флавоноїду та величини коефіцієнта молярного світлопоглинання (Taniguchi et al., 2023). Оскільки у квітках *E. annuus* за даними Yoo et al. (2008) переважають апігенін, лютеолін та їх глікозиди, можна проаналізувати фотопротекторний ефект цих сполук. Для цих флавонів характерна наявність двох смуг із високою поглинальною здатністю: смуга I (334 і 349 нм), смуга II (268 і 267 нм) відповідно апігеніну та лютеоліну в розчині метанолу (Taniguchi et al., 2023). Такі спектральні параметри підтверджують значну протекторну здатність відносно УФ-А (315–400 нм) та УФ-В (280–315 нм) радіації (Taniguchi et al., 2023). Тому підвищена локалізація флавоноїдів, що поглинають ультрафіолет, у поверхневих тканинах квіток інвазійних рослин може означати одночасне підвищення атрактивної та фотопротекторної здатності порівняно із нативними видами. Таку тенденцію слід розглядати як адаптивне підвищення репродуктивної системи інвазійного виду (Barrett et al., 2008). Інший аспект адаптивних змін, пов'язаний із підсиленням бар'єрної функції насінневої оболонки до несприятливих чинників середовища за рахунок підвищеного накопичення протекторних фенольних сполук, встановлено для інвазійного виду *Robinia pseudoacacia* (Fedenko, 2021). Отримані результати підтверджують роль фенольних сполук у підвищенні конкурентноспроможності інвазійних рослин згідно з гіпотезою зміни захисту (shifting defence hypothesis) (Shi et al., 2023).

Серед інших протекторних функцій фенольних сполук розглядають антиоксидантні та хелатувальні властивості, що забезпечують толерантність рослин *E. annuus* як гіперакумулятора металів (Zhang et al., 2021). Така толерантність обумовлена неспецифічною адаптивною реакцією рослин – метал/металоїд-індукованому підвищенню акумуляції фенольних сполук (Fedenko et al., 2020). У зв'язку з цим *E. annuus* запропоновано як об'єкт для фітореMediaції природних середовищ, забруднених металами (Fu et al., 2016), що відповідає сучасному тренду використання інвазійних рослин у таких технологіях (Fedenko, 2023).

Інший аспект отриманих результатів пов'язаний із сучасним напрямом використання інвазійних рослин для сучасної біосировини в продукти із різним функціональним призначенням (Lorenzo, Morais, 2023). Біомаса *E. annuus* відрізняється високим умістом фенольних сполук і тому перспективна як сировина для отримання біологічно активних сполук (Peter et al., 2021; Kovalev et al., 2023). Екстракти злинок однорічної проявляють протигрибкову, протизапальну, антидіабетичну, цитопротекторну та антиоксидантну активність (Rana et al., 2023). Оскільки *E. annuus* є неофіційною рослиною, отримані результати слід також розглядати у контексті фармакогносичного дослідження для розширення сировинної бази лікарських рослин та удосконалення системи неруйнівних методів аналізу фітопрепаратів (Brangule et al., 2020).

Висновки

У результаті порівняльного дослідження встановлено, що визначальною особливістю спектрів відбиття квіток інвазійного виду *Erigeron annuus* порівняно із квітками нативного виду *Achillea submillefolium* є підвищення інтенсивності максимуму УФ-поглинальних флавоноїдів у поверхневих тканинах. Виявлена особливість відповідає максимуму чутливості УФ-фоторецептора такого поширеного запилювача, як *Apis mellifera* L. Визначено характеристики диференційного спектру відбиття квіток спільно квітучих рослин як маркерні ознаки кольорового контрасту між інвазійним і нативним видами та атрактивний сигнал для УФ-рецептора запилювача. Квітки досліджених рослин також охарактеризовано специфічною сукупністю колориметричних параметрів. За даними диференційної колориметрії зіставний внесок в інтегральну величину колірної відмінності квіток порівнюваних видів встановлено для складових відмінностей за яскравістю і кольоровістю. Окрім атрактивності, світлопоглинальні властивості флавоноїдів забезпечують іншу важливу функцію – фотопротекторну. У квітках *E. annuus* серед флавоноїдів переважають апігенін, лутеолін та їх глікозиди, для яких наявність двох смуг із високою поглинальною здатністю може забезпечити значну протекторну здатність відносно УФ-А та УФ-В радіації. Тому підвищена локалізація флавоноїдів, що поглинають ультрафіолет, у поверхневих тканинах квіток інвазійних рослин може означати одночасне підвищення атрактивної та фотопротекторної здатності порівняно із нативними видами. Таку тенденцію слід розглядати як адаптивне підсилення репродуктивної системи інвазійного виду. Отримані результати підтверджують роль фенольних сполук у підвищенні конкурентноспроможності інвазійних рослин згідно з гіпотезою зміни захисту (shifting defence hypothesis). Оскільки біомаса *E. annuus* відрізняється високим умістом біологічно активних фенольних сполук, використані нами спектроскопія відбиття у видимому діапазоні та колориметрія можуть бути застосовані для розвитку сучасного напрямку – розширення сировинної бази лікарських рослин за рахунок використання інвазійних видів.

References

Baranovski, B. A., Karmyzova, L. A., Dubyna, D. V., Shevera, M. V. (2023). Bioecology and hemeroby of flora species in the Northern Steppe Dnipro Region. *Biosyst. Divers.*, 31(4), 548–577.

Barrett, S. C., Colautti, R. I., Eckert, C. G. (2008). Plant reproductive systems and evolution during biological invasion. *Mol. Ecol.*, 17(1), 373–383.

Brangule, A., Šukele, R., Bandere, D. (2020). Herbal medicine characterization perspectives using advanced FTIR sample

techniques—diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic spectroscopy (PAS). *Front. Plant Sci.*, 11, 356.

Brunet, J., Minahan, D. (2024). Honey bee pollination ecology. In: J. Purdy (ed.). *The foraging behavior of the honey bee (Apis mellifera, L.)*. Academic Press, 121–150.

Del Fabbro, C., Güsewell, S., Prati, D. (2014). Allelopathic effects of three plant invaders on germination of native species: a field study. *Biol. Invasions*, 16, 1035–1042.

Fedenko, V. S. (2022). Chemisorption of flavonoids from canadian goldenrod on aluminum oxide. *J. Chem. Technol.*, 2022, 30(3), 340–348 (in Ukrainian).

Fedenko, V. S. (2002). Cooperation of carotenoid and phenolic pigments in flowers polychroism formation of cryptophytes. *Fiziologiya i Biokhimiya Kul'turnykh Rastenij*, 34(3), 199–212 (in Russian).

Fedenko, V.S. (2007). Dose effect of cyanidin interaction with lead ions in roots of maize seedlings. *Ukr. Biochem. J.*, 79(2), 24–29 (in Ukrainian).

Fedenko, V. S. (2021). Spectral parameters of Robinia pseudoacacia L. seeds in technogenic conditions of urban environment. *Ecology and Noospherology*, 32(1), 35–40 (in Ukrainian).

Fedenko, V. S. (2023). Transformation of vegetation under the conditions of the impact of military actions on the natural environment in Ukraine: A review. *Ecology and Noospherology*, 34(2), 101–107 (in Ukrainian).

Fedenko, V. S., Shemet, S. A., Guidi, L., Landi, M. (2020). Metal/metalloid-induced accumulation of phenolic compounds in plants. In: M. Landi, S. A. Shemet, V. S. Fedenko (eds.). *Metal toxicity in higher plants*. Nova Science Publishers, 67–115.

Fedenko, V. S., Struzhko, V. S. (1998). Kolorymetriya u fiziologiyi ta biokhimiyi roslin [Colorimetry in plant physiology and biochemistry]. Dnipropetrovsk (in Ukrainian).

Ferrevera, M. L. F., Serra, P., Casati, P. (2021). Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. *Physiol. Plant.*, 173(3), 736–749.

Fu, S., Wei, C., Li, L. (2016). Characterizing the accumulation of various heavy metals in native plants growing around an old antimony mine. *Hum. Ecol. Risk Assess.*, 22(4), 882–898.

Gioria, M., Hulme, P. E., Richardson, D. M., Pyšek, P. (2023). Why are invasive plants successful? *Annu. Rev. Plant Biol.*, 74, 635–670.

Kovalev, S. V., Golovach, A. R., Kovalev, V. N., Khilya, V. P. (2023). Flavonoids from *Erigeron annuus*. *Chem. Nat. Compd.*, 59(4), 776–777.

Lisovets, O. I., Udzhmadzhuridze, V. H. (2022). Structure and seasonal dynamics of the adventitious fraction of the flora of "Gagarin Park" (Dnipro). *Ecology and Noospherology*, 33(2), 61–67.

Lorenzo, P., Morais, M. C. (2023). Strategies for the management of aggressive invasive plant species. *Plants*, 12(13), 2482.

Makino, T. T., Yokoyama, J. (2015). Nonrandom composition of flower colors in a plant community: mutually different co-flowering natives and disturbance by aliens. *PLoS One*, 10(12), e0143443.

Mosyakin, S. L. (2023). Proposal to conserve the name *Aster annuus* (*Erigeron annuus*, *Phalacrologium annuum*) (*Asteraceae/Compositae*) with a conserved type. *Taxon*, 72(4), 931–932.

Narbona, E., del Valle, J. C., Arista, M., Buide, M. L., Ortiz, P. L. (2021). Major flower pigments originate different colour signals to pollinators. *Front. Ecol. Evol.*, 9, 743850.

Parra-Tabla, V., Arceo-Gómez, G. (2021). Impacts of plant invasions in native plant–pollinator networks. *New Phytol.*, 230(6), 2117–2128.

Peter, A., Žlabur, J. Š., Šurić, J., Voća, S., Purgar, D. D., Pezo, L., Voća, N. (2021). Invasive plant species biomass – Evaluation of functional value. *Molecules*, 26(13), 3814.

- Radušienė, J., Karpavičienė, B., Raudonė, L., Vilkickytė, G., Čirak, C., Seyis, F., Yayla, F., Marksas, M., Rimkienė, L., Ivanauskas, L. (2023). Trends in phenolic profiles of *Achillea millefolium* from different geographical gradients. *Plants*, 12(4), 746.
- Rana, R., Pundir, S., Lal, U. R., Chauhan, R., Upadhyay, S. K., Kumar, D. (2023). Phytochemistry and biological activity of *Erigeron annuus* (L.) Pers. *Naunyn-Schmiedeberg's Arch. Pharmacol.*, 396, 2331–2346.
- Shi, J., Stahl, M., de Vos, R. C., Tielbörger, K., Verhoeven, K. J., Macel, M. (2023). Metabolomic profiling reveals shifts in defenses of an invasive plant. *Biol. Invasions*, 25, 3293–3306.
- Smoylovska, G. P., Mazulin, O. V., Yerenko, O. K., Maliuhina, O. O., Khortetska, T. V. (2021). Study of the composition of polyphenol compounds in herb of *Achillea setacea* Waldst. et Kit. and *Achillea submillefolium* Klok. et Krytzka. *Fitoterapia*, 3(3), 45–50 (in Ukrainian).
- Sooraj, N. P., Jaishanker, R., Athira, K., Sajeev, C. R., Lijimol, D., Saroj, K. V., Ammini, J., Pillai, M.S., Dadhwal, V. K. (2019). Comparative study on the floral spectral reflectance of invasive and non-invasive plants. *Ecol. Inform.*, 53, 100990.
- Suarez-Marino, A., Arceo-Gomez, G., Albor, C., Parra-Tabla, V. (2022). Co-flowering modularity and floral trait similarity help explain temporal changes in plant–pollinator network structure. *Plant Ecol.*, 223(10-12), 1289–1304.
- Szigeti, V., Fenesi, A., Botta-Dukát, Z., Kuhlmann, M., Potts, S. G., Roberts, S., Soltész, Z., Török, E., Kovács-Hostyánszki, A. (2023). Trait-based effects of plant invasion on floral resources, hoverflies and bees. *Insect Conserv. Divers.*, 16(4), 483–496.
- Taniguchi, M., LaRocca, C. A., Bernat, J. D., Lindsey, J. S. (2023). Digital database of absorption spectra of diverse flavonoids enables structural comparisons and quantitative evaluations. *J. Nat. Prod.*, 86(4), 1087–1119.
- Wäckers, F. L. (2004). Assessing the suitability of flowering herbs as parasitoid food sources: flower attractiveness and nectar accessibility. *Biological Control*, 29(3), 307–314.
- Warzecha, D., Diekötter, T., Wolters, V., Jauker, F. (2018). Attractiveness of wildflower mixtures for wild bees and hoverflies depends on some key plant species. *Insect Conserv. Divers.*, 11(1), 32–41.
- Yoo, N. H., Jang, D. S., Yoo, J. L., Lee, Y. M., Kim, Y. S., Cho, J. H., Kim, J. S. (2008). Erigeroflavanone, a flavanone derivative from the flowers of *Erigeron annuus* with protein glycation and aldose reductase inhibitory activity. *J. Nat. Prod.*, 71(4), 713–715.
- Zavialova, L. V., Protopopova, V. V., Kucher, O. O., Ryff, L. E., Shevera, M. V. (2021). Plant invasions in Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*, 9(4), 1–13.
- Zhang, H., Heal, K., Zhu, X., Tigabu, M., Xue, Y., Zhou, C. (2021). Tolerance and detoxification mechanisms to cadmium stress by hyperaccumulator *Erigeron annuus* include molecule synthesis in root exudate. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 219, 112359.