

UDC 504.3.054

Oksana Tykhenko, D.Sc. of Engineering, Ass. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-6459-6497 *e-mail*: okstih@ua.fm

Iryna Matvieieva, D.Sc. of Engineering, Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8636-0538 *e-mail*: iryna.valeriivna.matvieieva@gmail.com

Valentina Groza, PhD of Physico-mathematical Sciences, Ass. Prof.
e-mail: valentina.groza@gmail.com

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION OF THE VINNYTSIA USING PHYTOINDICATION METHODS

***Abstract.** Today, the anthropogenic impact on the environment is increasing, especially in urbanized areas and territories where active hostilities are taking place. Among a number of urgent environmental problems, it is possible to single out atmospheric air pollution, which occurs as a result of the concentration of road transport and industry in safe areas. The article presents the results of research into the state of atmospheric air pollution in the city of Vinnytsia using phytoindication methods, namely the degree of fluctuating asymmetry of warty birch leaves, and established the dependence of the fluctuating asymmetry on the level of traffic load. The research was conducted at the end of July in 2021 and 2022, after the end of the growing season of warty birch (*Betula pendula*). In the city of Vinnytsia, six representative experimental sites with different levels of anthropogenic load were identified. Fluctuation asymmetry coefficients of warty birch leaves were calculated for each experimental site and indicators of the asymmetry coefficient were determined. The level of motor vehicle load on experimental sites was established and a correlation-regression model of the dependence of the coefficient of fluctuation asymmetry of the leaves of the warty birch on the level of motor vehicle load was calculated. Conducting biomonitoring of aerotechnogenic pollution of urban ecosystems is necessary for finding ways to optimize its quality.*

***Key words:** phytoindication; warty birch; coefficients of fluctuation asymmetry; motor vehicle load*

О.М. Тихенко, І.В. Матвєєва, В.А. Гроза

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ МІСТА ВІННИЦЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ФІТОІНДИКАЦІЇ

***Анотація.** На сьогоднішній день антропогенний вплив на довкілля посилюється, особливо на урбанізованих та територіях, де ведуться активні бойові дії. Серед низки актуальних екологічних проблем можна виділити забруднення атмосферного повітря, що відбувається внаслідок концентрації автомобільного транспорту та промисловості на безпечних територіях. У статті наведені результати дослідження стану забруднення атмосферного повітря міста Вінниця із застосуванням методів фітоіндикації, а саме ступеня прояву флуктуаційної асиметрії листків берези бородавчастої, та встановлено залежність величини флуктуаційної*

асиметрії від рівня транспортного навантаження. Дослідження проводилися наприкінці липня у 2021 та 2022 рр., після закінчення вегетаційного періоду берези бородавчастої (*Betula pendula*). У місті Вінниця було визначено шість репрезентативних дослідних майданчиків із різним рівнем антропогенного навантаження. Розраховано коефіцієнти флуктуаційної асиметрії листків берези бородавчастої для кожної дослідної ділянки та визначено показники коефіцієнта асиметрії. Встановлено рівень автотранспортного навантаження на дослідних майданчиках та розраховано кореляційно-регресійну модель залежності величини коефіцієнта флуктуаційної асиметрії листків берези бородавчастої від рівня автотранспортного навантаження. Проведення біомоніторингу аеротехногенного забруднення урбоекосистем є необхідним для пошуку шляхів оптимізації його якості.

Ключові слова: фітоіндикація; береза бородавчата; коефіцієнти флуктуаційної асиметрії; автотранспортне навантаження

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.44-52>

Вступ

На сьогоднішній день антропогенний вплив на довкілля посилюється, зокрема і внаслідок ведення бойових дій [1]. Погіршення якості атмосферного повітря досить часто спостерігається і на відносно безпечних територіях.

На сьогоднішній день складовою частиною екологічного моніторингу якості повітря є фітоіндикація. Багато рослин чутливі до різних факторів зовнішнього середовища і можуть існувати лише в певних, часто вузьких межах своєї мінливості. При оцінці аеротехногенного навантаження на території метод фітоіндикації досить ефективний, оскільки живі системи надзвичайно чутливі до змін у довкіллі і мають здатність реагувати до того, як ці зміни стануть помітними. Перевагою використання фітоіндикаторів є те, що вони узагальнюють усі біологічно важливі дані про довкілля і відображають його стан у цілому; не вимагають використання дорогих методів дослідження; вказують шляхи та місця накопичення в екосистемах різних видів забруднення; дають змогу оцінити ступінь шкідливості речовин для живої природи [2].

Вінницька область в екологічному рейтингу областей України у 2021 р. була на 9-му місці, а у 2022 р. – на 10-му [3]. За офіційними даними, збільшилася кількість шкідливих викидів в області. Систематичні спостереження за вмістом шкідливих речовин в атмосферному повітрі м. Вінниця проводяться лабораторією спостережень за забрудненням атмосфери Вінницького обласного центру з гідрометеорології на двох стаціонарних постах (ПСЗ): ПСЗ № 1 розташований по вулиці Київська, 25; ПСЗ №2 – на Немирівському шосе, 29 [3, 4]. Проводиться моніторинг 15 забруднювальних домішок, з них основні – завислі речовини, діоксид сірки, оксид вуглецю та діоксид азоту і специфічні – фтористий водень, аміак, формальдегід та вісім важких металів (залізо, кадмій, манган, мідь, нікель, свинець, хром, цинк). Оцінка стану забруднення атмосферного повітря проводиться шляхом порівняння з відповідними гранично допустимими концентраціями (ГДК) речовин у повітрі населених міст. Механізм організації та здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря визначено у [6].

У липні 2022 р. в атмосферному повітрі міста Вінниця спостерігався помірний вміст діоксид азоту, фтористого водню та формальдегіду. Загалом по

місту середня за липень концентрація по діоксид азоту перевищувала ГДК_{сд} у 1,7 раза, по фтористому водню – у 1,6 раза, формальдегіду – 2,4 (табл. 1).

Таблиця 1. Середньомісячні концентрації забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Вінниця (в кратності ГДК_{сд}) за липень 2022 р. і в порівнянні з липнем 2021 р.

Домішки	Номери ПСЗ		По місту	
	1	2	2022 рік	2021 рік
	середньомісячні концентрації в кратності ГДК			
завислі речовини	0,7	0,5	0,6	0,5
діоксид сірки	0	0	0	0,0
оксид вуглецю	0,2	0,2	0,2	0,3
діоксид азоту	2,3	1,1	1,7	2,4
фтористий водень	1,5	1,6	1,6	1,5
аміак	не визначається	0,2	0,2	0,2
формальдегід	2,4	не визначається	2,4	1,5

За індексом забруднення атмосферного повітря (ІЗА) загальний рівень забруднення у липні 2022 р. по місту Вінниця характеризувався як високий і становив 7,5, але дещо нижчий ніж у 2021 р., коли становив 8,1 [3, 4].

Наразі, за даними екологічного чат-боту SaveEcoBot, у місті Вінниця встановлено 8 станцій моніторингу стану атмосферного повітря [7]. Основними джерелами забруднення повітря у місті Вінниця є підприємства харчової галузі: Вінницька кондитерська фабрика ROSHEN, Вінницький завод фруктових концентратів і вин «Солодка мрія», Вінницький масложиркомбінат (ViOil), Вінницький молокозавод ROSHEN та транспорт.

Метою дослідження є визначення якості атмосферного повітря міста Вінниця на основі флуктуаційної асиметрії листків берези бородавчастої (*Betula pendula*).

Методика дослідження

Для визначення аеротехногенного навантаження у місті Вінниця було застосовано метод фітоіндикації, що базується на морфогенетичному підході. Цей підхід засновано на внутрішньоіндивідуальній мінливості морфологічних структур, а саме, ступені прояву флуктуаційної асиметрії листя. Відхилення в симетрії може бути показником забруднення атмосферного повітря. Тобто, основною вимогою методу є наявність у рослин чітко вираженої двосторонньої асиметрії.

У міському середовищі оптимальними біоіндикаторами зазвичай є деревні рослини, тому що у деревних форм щорічно формується листя і багато видів має широке розповсюдження й чітко виражені ознаки, отже, це дає можливість проводити постійний моніторинг. Принцип дослідження базується на порушенні симетрії листової пластинки у деревних форм рослин під впливом антропогенного фактора. Як біоіндикатор, який був використаний для експрес-оцінки якості атмосферного повітря міста Вінниця за флуктуаційною асиметрією, була обрана береза бородавчаста (*Betula pendula*).

Для дослідження морфометричних параметрів листя збір матеріалу проводився після закінчення інтенсивного росту наприкінці липня. На кожній дослідній ділянці було зібрано по 40 листків. Листя було зібране з нижньої частини крони приблизно однакового розміру з максимальної кількості доступних гілок на рівні піднятої руки, всі листки упаковувались в поліетиленовий пакет, у нього поміщали етикетку з назвою місця і дати збору. Для вимірів довжини черешка, довжини і ширини листкової пластинки використовували вимірювальний циркуль та лінійку, для вимірювання кута між жилками використовувався транспортир.

Рівень флуктуаційної асиметрії листка визначали за методикою В.М. Захарова [8]. З кожного екземпляра знімали показники за п'ятьма ознаками з лівого і правого боків листка. Заміри здійснювалися вимірювальним циркулем та лінійкою, значення отримували у см, кут між жилками – транспортиром, показники відмічалися у градусах.

Листки вимірювалися за наступними параметрами з обох сторін:

1. ширина половини листка;
2. довжина другої від основи листка жилки 2-го порядку;
3. відстань між основою першої та другої жилок 2-го порядку;
4. відстань між кінцями першої та другої жилок 2-го порядку;
5. кут між основною жилкою і другою від основи листка жилкою 2-го порядку.

Величину асиметрії у рослин визначали як різницю у вимірах зліва і справа, віднесено до суми вимірів на двох сторонах. Спочатку для кожного листка за кожною ознакою розраховували відносні величини асиметрії. Для цього, згідно з формулою 1, визначали відмінність у вимірах кожної з п'яти ознак (A_i).

$$A_i = \frac{X_{л}-X_{п}}{X_{л}+X_{п}}, \quad (1)$$

де $X_{л}$ – модуль різниці між вимірами зліва; $X_{п}$ – модуль різниці між вимірами справа.

За допомогою значень флуктуаційної асиметрії листя за кожною ознакою було обчислено показник асиметрії для кожного листка (B_i), підсумовуючи їх, отримане значення ділили на кількість ознак ($N = 5$), формула 2:

$$B_i = \frac{A_1+A_2+A_3+A_4+A_5}{N}. \quad (2)$$

Після цього було визначене значення коефіцієнта асиметрії для кожної дослідної ділянки (X_i) за формулою 3:

$$X_i = \frac{B_1+B_2+\dots+B_q}{q}, \quad (3)$$

де q – кількість листків.

За середнім значенням коефіцієнта асиметрії листя можна зробити висновки про якість повітря на певній території відповідно до 5-бальної шкали якості середовища існування живих організмів за показником флуктуаційної асиметрії вищих рослин (для берези бородавчастої) (табл. 2).

Таблиця 2. Балова система якості середовища існування живих організмів за показником флуктуаційної асиметрії вищих рослин

Кількість балів	Коефіцієнт асиметрії (X_i)	Характеристика повітря
1 бал	До 0,055	Чисте повітря
2 бали	0,055-0,06	Відносно чисте повітря
3 бали	0,06-0,065	Забруднене повітря
4 бали	0,065-0,07	Сильно забруднене повітря
5 балів	Більше 0,07	Надто сильно забруднене повітря

Результати досліджень

Для дослідження забрудненості повітря на території міста Вінниця було виділено шість дослідних ділянок з різним ступенем антропогенного навантаження (рис. 1).

Ділянкою з найбільшим антропогенним навантаженням є ділянка № 1, яка розташована біля залізничного вокзалу, також поряд знаходяться кілька автостоянок (як самостійні, так і біля торговельних центрів).

Ділянка № 2, віддалена від центру міста, друга за ступенем забрудненості, вона піддається не лише впливу автотранспорту, а також знаходиться біля ПрАТ «Roshen».

Ділянка № 3 знаходиться в центрі міста, основний вплив на живі організми чинять викиди автотранспорту.

Ділянка № 4 розташована на території парку, біля селітебної зони.

Ділянка № 5 знаходиться за містом, її оточує лісовий масив. Проте, не дивлячись на віддаленість ділянки від міста, тут спостерігається досить інтенсивний рух автотранспорту на позаміській автомагістралі.

Ділянка № 6 знаходиться на околиці міста, але рух автотранспорту тут досить інтенсивний.

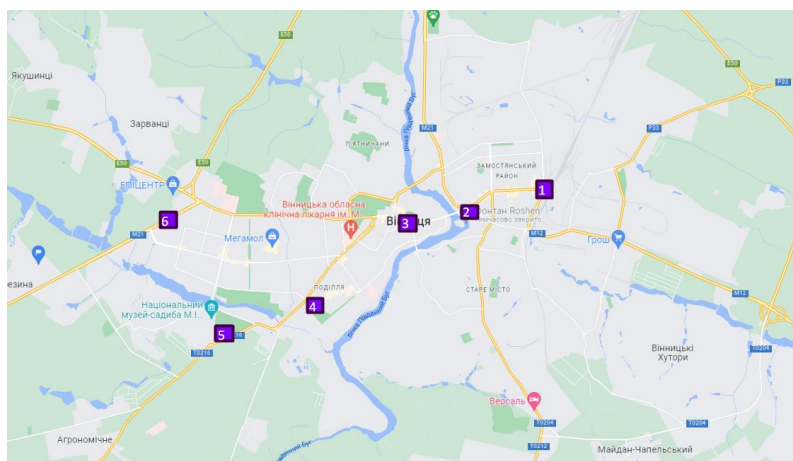


Рис. 1. Карта-схема дослідних ділянок

У табл. 3 наведена узагальнена характеристика дослідних ділянок та інтенсивність руху автотранспорту по кожній ділянці.

Таблиця 3. Характеристика дослідних ділянок

№ ділянки	Характеристика	Інтенсивність руху автотранспорту, авто/год		2022/ 2021 (x)
		2021	2022	
1	Ділянка поблизу залізничного вокзалу, також поряд розташовані кілька стоянок	6132	6252	1,019
2	Ділянка поблизу ПрАТ «Roshen»	3927	4021	1,023
3	Центр міста, основне джерело забруднення – викиди автотранспорту	3705	3744	1,010
4	Ділянка на території парку, біля селітебного району	974	935	0,96
5	Ділянка, що знаходиться за межею міста, лісовий масив	2539	2756	1,085
6	Район з посиленням рухом автотранспорту	4546	4632	1,018

В результаті проведення дослідження аеротехногенного забруднення міста Вінниця було розраховано середній коефіцієнт асиметрії для кожної дослідної ділянки в 2021 та 2022 рр. (рис. 2, 3).

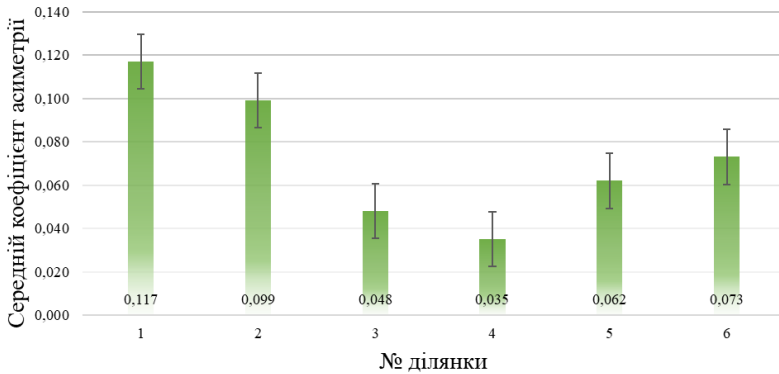


Рис. 2. Значення середнього коефіцієнта асиметрії листків на дослідних ділянках у 2021 р.

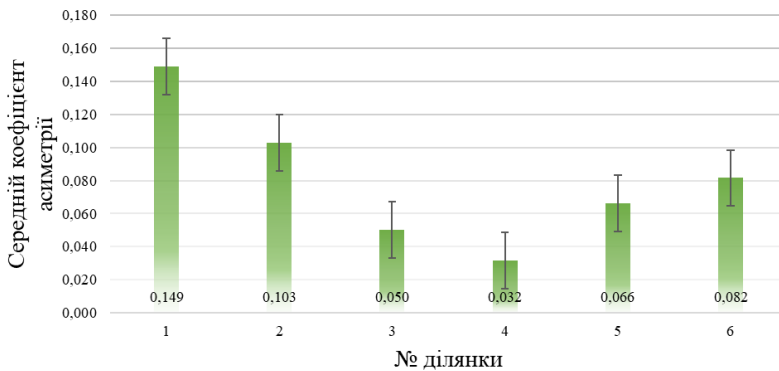


Рис. 3. Значення середнього коефіцієнта асиметрії листків на дослідних ділянках у 2022 р.

Відповідно до балової системи якості середовища існування живих організмів за показником флуктуаційної асиметрії вищих рослин (для берези бородавчатої) (табл. 2) визначено рівень аеротехногенного забруднення.

Практично по усіх дослідних ділянках спостерігається зростання коефіцієнта асиметрії у 2022 р. у порівнянні з 2021 р. Найбільше зростання коефіцієнта асиметрії спостерігається на дослідній ділянці № 1, що можна пов'язати зі збільшенням рівня транспортного навантаження (табл. 3).

Також збільшився коефіцієнт асиметрії на дослідній ділянці № 2, 5, 6, що також можна пов'язати зі збільшенням інтенсивності руху автотранспорту у даних районах.

Найменший показник коефіцієнта асиметрії у 2021 р. спостерігається на дослідній ділянці № 3, найбільший – на ділянці № 1. У 2022 р. найбільший показник спостерігається також на ділянці № 1, найменший – на ділянці № 3. На рис. 4 відображена динаміка зміни коефіцієнта асиметрії листя берези бородавчатої у 2021 і 2022 рр.

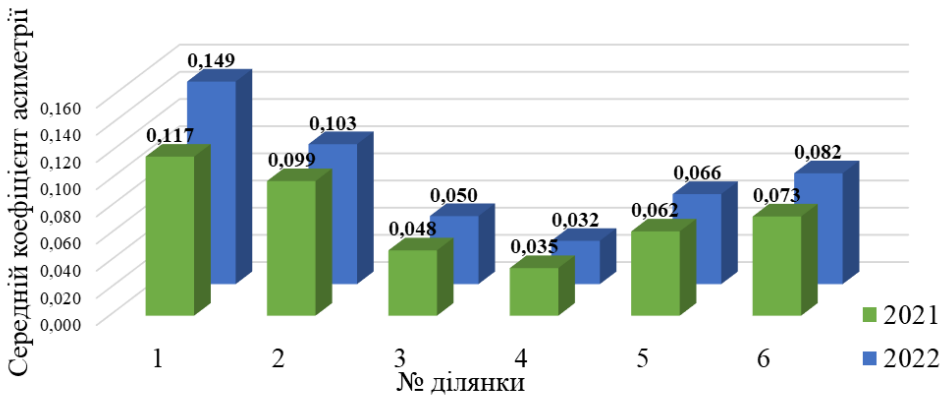


Рис. 4. Динаміка коефіцієнта асиметрії 2021–2022 рр.

З метою визначення зв'язку між коефіцієнтом асиметрії та транспортним навантаженням було створено регресійну модель (табл. 4).

Таблиця 4. Розрахунок параметрів рівняння регресії

№ ділянки	2022/ 2021 (y)	x	Розрахункові величини			Теоретичне значення \hat{y}	Квадрат відхилень	
			yx	y ²	x ²		($\hat{y} - y_{сер}$) ²	(y - \bar{y}) ²
1	1,27	1,019	1,299	1,623	1,04	1,075	2,84E-08	0,03937
2	1,04	1,023	1,065	1,082	1,049	1,080	1,96E-05	0,00156
3	1,04	1,010	1,055	1,089	1,021	1,066	9,40E-05	0,00050
4	0,9	0,96	0,873	0,827	0,922	1,013	3,97E-03	0,01062
5	1,07	1,085	1,16	1,142	1,178	1,145	4,80E-03	0,00578
6	1,12	1,018	1,138	1,248	1,038	1,075	7,31E-07	0,00180
Σ	6,453	6,2	6,664	7,012	6,41	6,453	0,01036	0,0596
Середнє	1,076	1,033	1,11	1,169	1,069	1,076	0,00148	0,0099

Розрахунок парного коефіцієнта кореляції ($r = 0,927$) показав високий ступінь зв'язку між аналізованими параметрами. Різниця між індексом

кореляції та коефіцієнтом кореляції менше 0,1, тоді зв'язок вважати прямолінійним: $i - r = 0,976 - 0,927 = 0,049$. Отже, в якості моделі можна використовувати регресійне рівняння $\bar{y} = 0,00124 + 1,053 * x$.

Висновки

1. За результатами дворічного дослідження флуктуаційної асиметрії листя берези бородавчастої проаналізовано зміни якості повітря у місті Вінниця. За бальною системою якості середовища існування живих організмів за показником флуктуаційної асиметрії вищих рослин встановлено, що в центрі міста (дослідна ділянка № 3) рівень забруднення повітря низький, тобто в цьому районі спостерігається мінімальне аеротехногенне навантаження. Дуже високий рівень забруднення повітря встановлений на ділянці поблизу залізничного вокзалу (дослідна ділянка № 1).

2. Регресійне рівняння $\bar{y} = 0,00124 + 1,053 * x$ показує залежність зміни коефіцієнта асиметрії (\bar{y}) від зміни транспортного навантаження і його можна використовувати для визначення змін інтенсивності руху транспорту в залежності від динаміки флуктуаційної асиметрії, що є важливим для діагностики стану міського середовища і надасть можливість швидко та зручно визначати динаміку змін аеротехногенного навантаження на урбоєкосистеми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рибалова О. В., Бригада О. В., Ільїнський О. В., Бондаренко О. О., Рихлик К. В. Забруднення атмосферного повітря на Сході України внаслідок бойових дій. *Science and innovation of modern world. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference.* (October 26-28, 2022). Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2022. PP. 319–328. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/10/SCIENCE-AND-INNOVATION-OF-MODERN-WORLD-26-28.10.22.pdf>.
2. Nykytiuk P. Phytoindication: basic diagnostic characteristics and approaches. *Danish Scientific Journal.* №35, 2020. PP. 5–9.
3. Вінниччина – в екологічному рейтингу областей. FOCUS.UA: веб-сайт. URL: <https://focus.ua/uk/ratings/504721-ekologicheskij-reyting-oblastey-ukrainy-2021>.
4. Щомісячний бюлетень забруднення атмосферного повітря міста Вінниці за липень 2021 року № 07 / Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Вінницький обласний центр з гідрометеорології. URL: <https://www.vmr.gov.ua/ecology#3>.
5. Щомісячний бюлетень забруднення атмосферного повітря міста Вінниці за липень 2022 року № 07 / Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Вінницький обласний центр з гідрометеорології. URL: <https://www.vmr.gov.ua/ecology#3>.
6. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. Постанова Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#n18>.
7. SaveEcoBot: Мапа якості атмосферного повітря. URL: <https://www.saveecobot.com/maps#7/48.698/24.961/aqi>.
8. Савосько В. М. Методика дослідження флюктуючої асиметрії листків деревних видів в промислових регіонах (на прикладі берези повислої (*Betula pendula* Roth)). Екологічний вісник Криворіжжя: збірник наукових та науково-методичних праць. Кривий Ріг, 2015. Вип. 1. С. 105–110. <https://doi.org/10.31812/123456789/2933>.

Стаття надійшла до редакції 11.07.2022 і прийнята до друку після рецензування 24.10.2022

REFERENCES

1. Rybalova, O.V., Bryhada, O.V., Ilinskyi, O.V., Bondarenko, O.O., & Rykhlyk, K.V. (2022). Zabrudnennia atmosfernoho povitria na Skhodi Ukrainy vnaslidok boiovykh dii. In *Science and innovation of modern world. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference* (pp. 319–328). London, United Kingdom: Cognum Publishing House. Retrieved from: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/10/SCIENCE-AND-INNOVATION-OF-MODERN-WORLD-26-28.10.22.pdf> [in Ukrainian].
2. Nykytiuk, P. (2020). Phytoindication: basic diagnostic characteristics and approaches. *Danish Scientific Journal*, 35, 5–9.
3. Vinnychchyna – v ekolohichnomu reitynhu oblastei. FOCUS.UA. Retrieved from: <https://focus.ua/uk/ratings/504721-ekologicheskyy-reyting-oblastey-ukrainy-2021>.
4. Shchomisiachnyi biuletyn zabrudnennia atmosfernoho povitria mista Vinnytsi za lypen 2021 roku № 07. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. Vinnytskyi oblasnyi tsentr z hidrometeorolohii. Retrieved from: <https://www.vmr.gov.ua/ecology#3>.
5. Shchomisiachnyi biuletyn zabrudnennia atmosfernoho povitria mista Vinnytsi za lypen 2022 roku № 07. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. Vinnytskyi oblasnyi tsentr z hidrometeorolohii. Retrieved from: <https://www.vmr.gov.ua/ecology#3>.
6. Deiaki pytannia zdiisnennia derzhavnoho monitorynhu v haluzi okhorony atmosfernoho povitria. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 14 serpnia 2019. № 827. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#n18>.
7. SaveEcoBot: Mapa yakosti atmosfernoho povitria. Retrieved from: <https://www.saveecobot.com/maps#7/48.698/24.961/aqi>.
8. Savosko, V.M. (2015). Metodyka doslidzhennia fliktuiuchoi asymetrii lystkiv derevnykh vydiv v promyslovykh rehionakh (na prykladi berezy povysloi (*Betula pendula* Roth)). *Ekolohichniy visnyk Kryvorizhzhia: zbirnyk naukovykh ta naukovo-metodychnykh prats*, 1, 105–110 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31812/123456789/2933>.

The article was received 11.07.2022 and was accepted after revision 24.10.2022

Тихенко Оксана Миколаївна

д.т.н., доц., професор кафедри екології Національного авіаційного університету
Адреса робоча: 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1
ORCID ID: 0000-0001-6459-6497 *e-mail*: okstih@ua.fm

Матвєєва Ірина Валеріївна

д.т.н., проф., професор кафедри екології Національного авіаційного університету
Адреса робоча: 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1
ORCID ID: 0000-0002-8636-0538 *e-mail*: iryna.valeriivna.matvieieva@gmail.com

Гроза Валентина Анатоліївна

к.ф.-м.н., доц., доцент кафедри екології Національного авіаційного університету
Адреса робоча: 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1
e-mail: valentina.groza@gmail.com