

ЕКОЛОГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.17

УДК 504.064:504.054, 502.052

Непошивайленко Н.О., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0759-2451, e-mail: nna2013@ukr.net

Грицан Ю.І., д.б.н., професор, ORCID: 0000-0002-7443-0930, e-mail: gritsan@i.ua

Петрик Ю.А., здобувач другого (магістерського) рівня, e-mail: bts.life777@gmail.com

Губа О.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: gubacom03@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Neposhyvailenko Natalia, Candidate of engineering sciences, Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection

Hrytsan Yuri, Doctor of biology sciences, Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection

Petryk Yuliia, master's degree student

Huba Oleksandr, postgraduate Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ФЛУКТУЮЧОЇ АСИМЕТРІЇ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ м. КАМ'ЯНСЬКЕ

*Опрацьовано методику оцінки якості навколишнього середовища за інтегральним показником флуктуючої асиметрії листової пластини рослин роду *Populus* та запропоновано шкалу оцінювання, яка відрізняється значеннями градієнтів та дозволяє адекватно оцінити стан довкілля та потужність впливу екологічних факторів. Розраховано інтегральний показник флуктуючої асиметрії листових пластин рослин виду *Populus canadensi* для 30 дослідних ділянок, які рівномірно розподілені територією м. Кам'янське та охоплюють усі функціональні зони. Усереднена величина асиметрії для промислових зон є найвищою та складає 0,088, для селітебних — 0,066, для рекреаційних — 0,058, для контрольної зони — 0,046. Проведено порівняння результатів усередненого інтегрального показника асиметрії листа рослин виду *Populus canadensi* за десятирічний період для м. Кам'янське та встановлена залежність від обсягів викидів в атмосферу забруднюючих речовин.*

Ключові слова: оцінка якості навколишнього середовища; інтегральний показник флуктуючої асиметрії; рослин роду *Populus*; функціональні зони; викиди.

*The methodology for assessing the quality of the environment by the integral indicator of the fluctuating asymmetry of the leaf blade of plants of the genus *Populus* is developed and an assessment scale is proposed, which differs in the values of gradients and allows an adequate assessment of the state of the environment and the power of the influence of environmental factors. The integral index of the fluctuating asymmetry of the leaf blades of *Populus canadensi* plants was calculated for 30 experimental plots, which are evenly distributed over the territory of Kamianske and cover all functional zones. The average value of asymmetry for industrial zones is the highest and amounts to 0.088, for rural zones — 0.066, for recreational zones — 0.058, for the control zone — 0.046. The results of the averaged integral index of leaf asymmetry of *Populus canadensi* plants for a ten-year period for the city of Kamianske were compared and the dependence on the volume of pollutant emissions into the atmosphere was established.*

Keywords: environmental quality assessment; integral indicator of fluctuating asymmetry; *Populus canadensi* plants; functional zones; emissions.

Постановка проблеми

Місто Кам'янське є одним із найбільш розвинутих індустріальних центрів Дніпропетровської області та України і входить до десятки найбільш забруднених населених пунктів України через велику кількість шкідливих викидів у повітря. У місті спостерігається небезпечна екологічна ситуація, яка виникла через тривалий та інтенсивний розвиток уранопереробної, металургійної, хімічної та машинобудівної галузей промисловості без врахування екологічних наслідків та можливої шкоди для довкілля і здоров'я мешканців.

Згідно аналітичної інформації про екологічний стан м. Кам'янське та стан виконання природоохоронних заходів Екологічної програми міста Кам'янського на 2016—2020 роки [1] промисловий комплекс міста становлять 36 провідних великих та середніх підприємства різного профілю, які викидають в атмосферу біля 100 забруднюючих речовин. В основному, забруднення атмосферного повітря міста від стаціонарних джерел формується за рахунок викидів 7 основних підприємств-забруднювачів, серед яких ПАТ «Дніпровський меткомбінат», ПрАТ «ДКХЗ», ПрАТ «ЮЖКОКС», АТ «ДНІПРОАЗОТ». Близько 98 % викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря міста припадає на зазначені підприємства. Зменшення обсягів виробництва на цих підприємствах призвело до скорочення кількості викидів забруднюючих речовин, як зазначено на рис. 1. Загалом показники викидів мають хвилеподібну динаміку, що свідчить про відсутність чіткої екологічної політики та планомірної роботи підприємств міста над вирішенням питань забруднення атмосфери [2].

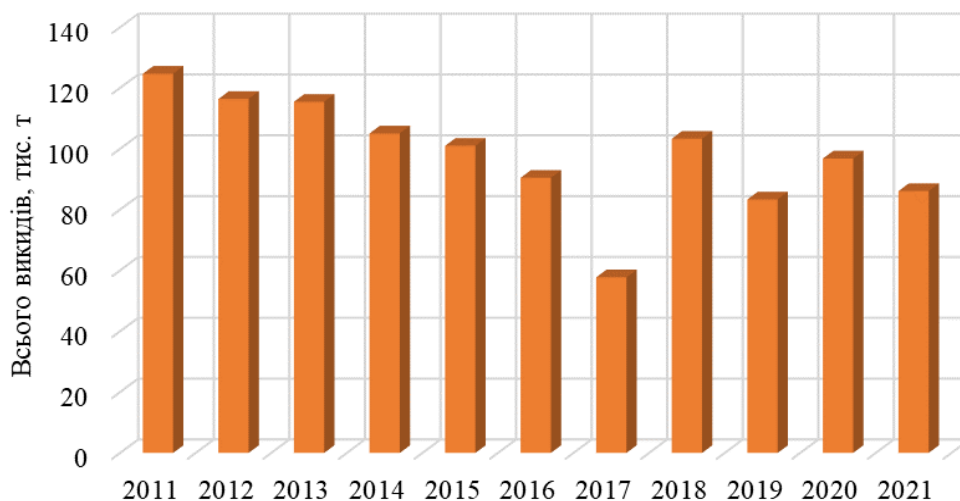


Рис. 1. Динаміка загальних викидів забруднюючих речовин у м. Кам'янське, тис. тонн

Згідно комплексного індексу забруднення атмосфери, обчисленому за даними спостережень за останні 10 років [1], рівень забруднення атмосферного повітря залишається вище середнього та сягає значення $14,3 \pm 3,0$. Спостерігається тенденція збільшення рівня забруднення повітря за двооксидом сірки, оксидом азоту, сірководнем, фенолом, формальдегідом при сталих показниках величини середніх концентрацій пилу, оксиду вуглецю, двооксиду азоту, аміаку.

Отже, якість повітря м. Кам'янське не відповідає нормативним вимогам. Екологічна ситуація загострюється тим, що викиди в атмосферу здійснюються нерівномірно, та переважно в промислових зонах, де велика концентрація підприємств металургійної, машинобудівної, хімічної та іншої промисловості. Тому, здійснення постійного екологічного моніторингу для міста є актуальною задачею, яку не завжди можна вирішити із застосуванням стандартних інструментальних методів вимірювань [3]. А використання інших альтернативних методів оцінки якості навколишнього середовища (біомоніторинг та біоіндикація, методи дистанційного зондування землі, сучасні експрес-методи аналізу тощо) дозволять з мінімальними технологічними зусиллями аналізувати екологічну ситуацію техноекосистеми, проводити її зонування згідно даних багаторічних спостережень, прогнозувати подальший розвиток урбосистем за їх функціональним призначенням.

Для вирішення цього завдання проведено оцінку якості навколишнього середовища урбосистеми м. Кам'янське, що розподілена на зони рекреаційного, селітебного та промислового призначення, із застосуванням методів фітоіндикації, а саме показника флуктуючої асиметрії листової пластинки деревних рослин виду *Populus canadensis* (Тополя канадська).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останнім часом, враховуючи постійне техногенне навантаження на урбанізовані екосистеми, що призводить до накопичення забруднень різної етіології, концентрації та шкідливої дії, зростає необхідність запровадження різноманітних типових та альтернативних систем екологічного моніторингу для оцінки та контролю якості навколишнього середовища [4—5]. Вибір підходів для здійснення моніторингу довкілля дозволяє користувачам кінцевого продукту обрати для себе більш прийнятний варіант спираючись на технічні можливості ведення моніторингу, точності та надійності отриманих результатів, швидкості оновлення даних та можливості застосування методу у відповідних умовах. Такий підхід до екологічного моніторингу відкриває можливості для ефективного контролю за якістю довкілля, розробки стратегій для покращення та відновлення здорового стану навколишнього середовища. Системи моніторингу стають важливим інструментом для охорони довкілля, підтримки системи озеленення в урбосистемах та забезпечення громадського здоров'я.

Отже, для визначення рівня забруднення навколишнього середовища застосовують, у тому числі, і біологічні методи екологічного моніторингу. Найпоширенішими серед них є методи біоіндикації та біотестування, зокрема фітоіндикації. Методи біоіндикації та біотестування використовуються для виявлення впливу техногенного навантаження на біоценози, що дозволяє аналізувати вплив екологічних факторів на різні аспекти біологічних систем [6]. Зокрема методи фітоіндикації знайшли широке застосування для інтегральної оцінки якості навколишнього середовища, сутність яких полягає у виявленні ступеня прояву асиметрії органів будь-яких живих організмів. Наприклад рослинам притаманне формоутворення на основі радіальної або білатеральної симетрії, що є ознакою правильного і стійкого формоутворення, в той час як відхилення від симетрії вказують на вплив стресових факторів на організм [7]. Аналіз симетрії та виявлення асиметрії органів рослин може служити індикатором екологічного стресу та оцінювати зміни у навколишньому середовищі. Отже, методи фітоіндикації допомагають зрозуміти вплив змінних екологічних чинників на біологічні системи та біоценози.

Виділяють декілька типів характерних ознак асиметрії: спрямовану, антисиметрію та флуктуючу асиметрію. Флуктуюча асиметрія (варіація розвитку) проявляється у вигляді випадкової двосторонньої, радіальної, трансляційної, спіральної або самоподібної асиметрії. На початку 1930-х років Б. Астауров та В. Людвіг визнали флуктуючу асиметрію особливим видом асиметрії [8]. Зокрема Людвіг визнав популяційні аспекти випадкових варіацій розвитку, розробив індекс асиметрії та ввів термін «флуктуюча асиметрія». У 1953 році Кеннет Мазер для індексу середньої асиметрії використовував дисперсію різниці між кількістю ознак на лівій і правій сторонах. Він виділив високу та знижену асиметрію, щоб виключити стабільність розвитку за спадкову ознаку. Однак лише в 1962 році Лі Ван Вален [9] віродив термін «флуктуюча асиметрія», і завдяки роботам Палмера та Стробека [10—11], що набули удосконалення за останні 35 років, методи флуктуючої асиметрії і наразі залишаються популярним в екологічних дослідженнях, не дивлячись на жорстку критику у бік застосування даної методики [12, 18]. Як вважає John H. Graham [8], хибне ставлення до методів флуктуючої асиметрії пов'язане з відсутністю належного відтворення та масштабування обсягів досліджень, похибки вимірювань та ігнорування поєднання адитивних і мультиплікативних похибок, підміни понять потенційних стресорів.

Наприклад, колектив авторів Mikhail V. Kozlov, Vitali Zverev, Elena L. Zvereva [13], зазначають, що чутливість флуктуаційної асиметрії та інших морфологічних ознак не варто зіставляти зі стресом рослин безпосередньо. А в публікації [12] Tobias M. Sandner та ін. дійшли висновку, що метод флуктуаційної асиметрії не може розглядатися як надійний індикатор екологічного стресу, викликаному впливом важких металів, навіть якщо його кількісно вимірювати сучасними методами. В супереч цьому, в публікації [14] колектив авторів за результатами власних досліджень доводить зв'язок мінливості флуктуаційної асиметрії листків *Betula pendula* з кліматичними та антропогенними параметрами, які в сукупності пояснюють 89 % змін параметрів.

рів середовища, та пропонують застосовувати даний показник для оцінки умов зростання *Betula pendula* за градієнтом збільшення техногенного навантаження, що дає можливість проводити порівняльні біомоніторингові дослідження на території міст та посттехногенних територіях.

Вітчизняні вчені [15—17, 19, 20] також вважають показник флуктуючої асиметрії надійним біоіндикаційним маркером життєвого стану рослинних організмів, оскільки має тенденцію до неспецифічного зростання при стресі. У зазначених статтях відображено результати дослідження флуктуючої асиметрії листових пластинок в умовах впливу техногенних чинників золошлаковідвалів Бурштинської ТЕС, урботехногенного середовища м. Кривий Ріг, у тому числі металургійного комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг», урбосистеми м. Рівне, зокрема в межах зон з інтенсивним рухом автотранспорту та щільною житловою забудовою, та інших антропогенних чинників на територіях з підвищеним екологічним ризиком.

Для фітоіндикації на ряду з традиційним видом рослинних організмів *Betula pendula*, що використовується для методів флуктуючої асиметрії, науковцями пропонується застосовувати різні види деревних рослин. Наприклад, Бессонова В.П. та Чонгова А.С. [21] у своїх дослідженнях морфометричних показників деревних рослин, що зростають в умовах техногенного забруднення м. Дніпро з різним рівнем забруднення атмосферного повітря як автомобільними так і промисловими викидами, визначають, що найбільш придатними для біоіндикації стану довкілля є *Acer pseudoplatanus L.* і *Tilia cordata Mill.* Руденко С.С. та Махрова Є.Г. [18] в якості біоіндикаторів застосовують *Quercus robur L.*, як одну з основних лісоутворюючих порід Буковини. Гаврикова В.С. в якості тест-об'єкту застосовує вид *Acer saccharinum L.*, який широко розповсюджений на території України і зокрема на Київщині [22]. Семак У.Й. [15] розташовує досліджувані види дерев у наступний ряд чутливості до техногенного навантаження за показником флуктуючої асиметрії: *Betula pendula Roth* → *Salix caprea L.* → *Populus tremula L.* та зазначає, що усі аналізовані види можуть використовуватися у біоіндикаційних дослідженнях як чутливі сенсори до техногенного навантаження.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що методи фітоіндикації залишаються актуальними для визначення антропогенного навантаження на урботехносистему, а результати моніторингових спостережень за інтегральним показником флуктуючої асиметрії відрізняються значною адекватністю, що дозволяє їх використовувати для моніторингу техногенно навантажених територій. Тому, використання деревних рослин за методикою флуктуючої асиметрії варто застосовувати в системі екологічного моніторингу м. Кам'янське в рамках постійного спостереження за станом довкілля в масштабах урбосистеми та окремих функціональних зон міста.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є апробація методів фітоіндикації в системі екологічного моніторингу м. Кам'янське із застосуванням показника флуктуючої асиметрії листової пластинки деревних рослин виду *Populus canadensis* (Тополя канадська) та проведення оцінки якості навколишнього середовища з урахуванням функціональних зон урбосистеми.

Виклад основного матеріалу

Місто Кам'янське загальною площею 11 769 га у своєму складі містить промислово-складську зону, що представлена великими промисловими районами і декількома промвузлами загальною площею 2 784,4 га [23]. Під багатоквартирне будівництво та громадську забудову відведено 1 462,3 га міських земель. Землі транспорту та транспортного зв'язку займають 2 047,3 га. Також в місті наявні зони рекреаційного призначення штучного та природного походження на площі 900,9 га. Враховуючи наведений функціональний розподіл загальної площі м. Кам'янське закладено 30 дослідних ділянок розміром 1 км², які рівномірно розподілені територією міста та максимально охоплюють найбільш потужні промислові, транспортні, селітебні та рекреаційні зони, як зазначено на рис. 2. В якості контрольної ділянки, в межах якої мінімізований антропогенний вплив, обрано природний заповідник «Дніпровсько-Орільський», розташований в 20 км на захід від м. Кам'янське нижче за течією р. Дніпро.

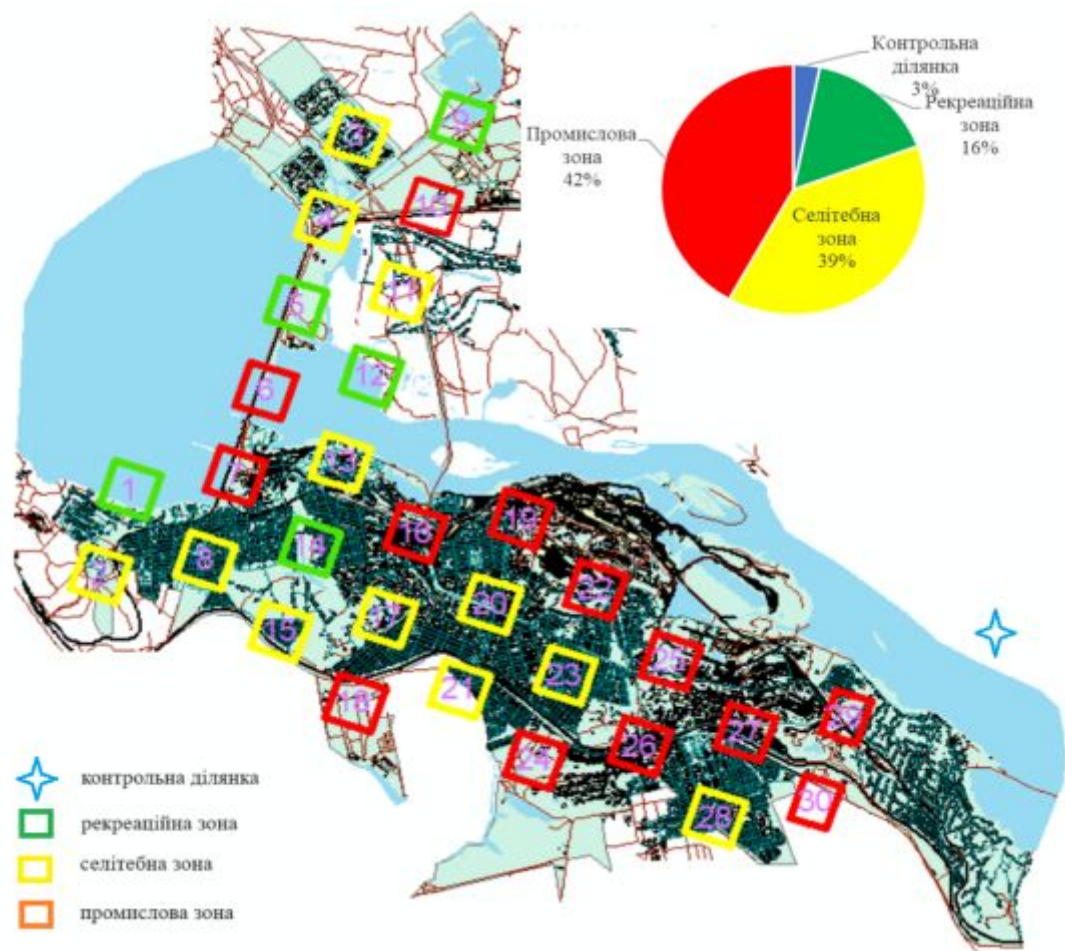


Рис. 2. Розподіл за функціональним призначенням кількості дослідних ділянок для екологічного моніторингу м. Кам'янське методами флуктуючої асиметрії

За результатами проведених досліджень [24] в межах селітебної, транспортної та санітарно-захисної зони промислових підприємств, а також окремих рекреаційних зон м. Кам'янське виявлено близько 80 тис. деревних рослин, що формуються 40 родами, домінуючими з яких є тополя (включаючи її види), акація, каштан, клен. Тому, для дослідження обрана деревна рослина виду *Populus canadensis* (Тополя канадська) як найбільш домінуюча серед даного роду рослин у місті.

Для екологічного біомоніторингу вибраний орган деревної рослини — листова пластинка, що володіє білатеральною симетрією. Листя середньої величини *Populus canadensis* збиралося з рослин, що досягли генеративного стану, з нижньої частини крони з різних сторін світу. При виборі рослин враховувалась чіткість визначення приналежності до досліджуваного виду та умови зростання особини. Листя збиралося з дерев, що знаходяться в однакових природних умовах (рівень освітленості, вологості і тому подібне). Для аналізу не використовувались молоді і старі екземпляри, лише середньовікові рослини. Всі листки після збору пакувались в марковані відповідно до місця збору поліетиленові пакети, які зберігали в холодильнику до двох днів.

Збір матеріалу проводили після зупинки зростання листя на початку серпня. Кожна вибірка відповідної дослідної ділянки включала 100 листків (по 10 листків з 10 рослин).

Вимірювання основних параметрів листових пластин проводили за п'ятьма морфометричними параметрами (ознаками): ширина половинки листка; довжина 2-ої жилки II порядку від основи листка; відстань між основами 1-ої та 2-ої жилки II порядку; відстань між кінцями цих жилок; кут між головною жилкою і 2-ою від основи II порядку. Вимірювання проводили на зібраному матеріалі за допомогою штангенциркуля, лінійки та транспортира.

Величина асиметрії оцінювалась за допомогою інтегрального показника — величини середньої відносної похибки на ознаку. Подібні обрахунки проводили для кожної ознаки. В результаті проведених обчислень отримали 5 значень для однієї листової пластинки. Такі ж обрахунки провели для кожної деревної рослини для відповідної вибірки. Визначали середню відносну відмінність для кожної вибірки листя (дослідної ділянки відбору матеріалу) за формулою:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_{лі} - X_{пі}) / (X_{лі} + X_{пі})] / N}{n},$$

де $X_{лі}$ — значення виміряного показника з лівого боку листка; $X_{пі}$ — значення показника з правого боку листка; N — число ознак, за якими проводились виміри ($N = 5$); n — кількість листків для кожного дерева ($n = 10$).

Зазначені обчислення виконано для кожної листової пластини відповідного дерева, потім розраховано як середньоарифметичне значення величини асиметрії для кожної ділянки. Для розрахунків застосований програмний продукт Microsoft Excel.

Обчислені значення інтегрального показника флуктуючої асиметрії листової пластини мають бути співставлені зі шкалою оцінювання, завдяки якій можна провести оцінку якості навколишнього середовища. Слід зазначити, що в науковій спільноті користуються шкалою оцінювання, введеною В.М. Захаровим та ін. [25], розробленою для деревної рослини роду *Betula* (Береза), або взагалі уникають проведення оцінювання з посиланням на певну градацію, що обумовлено оцінюванням за замовчуванням — найбільше відхилення від симетрії свідчить найбільший прояв стресу екологічних факторів для рослин.

Екологічний моніторинг у м. Кам'янське за методикою флуктуючої асиметрії інтервально проводився впродовж 10 років (2013, 2015, 2017, 2023 роки) [19, 20, 26, 27]. В результаті отримано значний масив даних інтегрального показника флуктуючої асиметрії листової пластини рослин виду *Populus canadensis* для умов м. Кам'янське. Враховуючи накопичений масив даних багаторічних спостережень та досвід науковців щодо чутливості до техногенного навантаження за показником флуктуючої асиметрії певних видів деревних рослин авторами цього дослідження запропоновано ввести шкалу оцінювання інтегрального показника флуктуючої асиметрії листової пластини рослин виду *Populus canadensis*. Згідно запропонованої шкали, як і для сформульованої для рослини роду *Betula*, значення інтегрального показника асиметрії, який відповідає першому балу, характерно для рослин, що зростають у сприятливих умовах; п'ятий бал — свідчить про пригніченість рослин та їх зростання в умовах високих рівнів стресу (табл. 1).

Таблиця 1. Шкала оцінювання якості середовища за результатами величини інтегрального показника флуктуючої асиметрії листа рослин роду *Betula* та *Populus*

Бали	Величина асиметрії листа (для рослин роду <i>Betula</i>)	Характеристика середовища	Умови для зростання рослин	Величина асиметрії листа (для рослин роду <i>Populus</i>)*
1	< 0,040	Умовно чисте	Умовна норма	<0,060
2	0,040 — 0,044	Помірно забруднене	Слабкий вплив несприятливих чинників	0,060 — 0,064
3	0,045 — 0,049	Забруднене	Вплив несприятливих чинників	0,065 — 0,069
4	0,050 — 0,054	Сильно забруднене	Значний вплив несприятливих чинників	0,070 — 0,74
5	> 0,054	Несприятливі умови	Рослини перебувають в сильно пригнічених умовах	>0,074

* — запропоновано авторами наукового дослідження

За результатами проведених розрахунків інтегрального показника флюктуючої асиметрії листової пластини рослини виду *Populus canadensis* для території м. Кам'янське, встановлено, що в межах промислових зон та транспортних магістралей рослини зростають у вкрай несприятливих умовах та перебувають у сильно пригніченому стані, що характеризується усередненою величиною асиметрії для цих зон **0,088**. Високий показник асиметрії **0,066** характерний для рослин, які зростають в межах селітебних зон м. Кам'янське, що свідчить про значний рівень забруднення навколишнього середовища в цих функціональних зонах. Усереднений інтегральний показник асиметрії листа рослин виду *Populus canadensis*, які зростають в межах рекреаційних зон, дорівнює **0,058**, що свідчить про умовну норму щодо забруднення навколишнього середовища. Проте цей показник є значно гіршими, ніж у заповідній екологічно чистій зоні, де величина асиметрії є найнижчою з усіх визначених та дорівнює **0,046**.

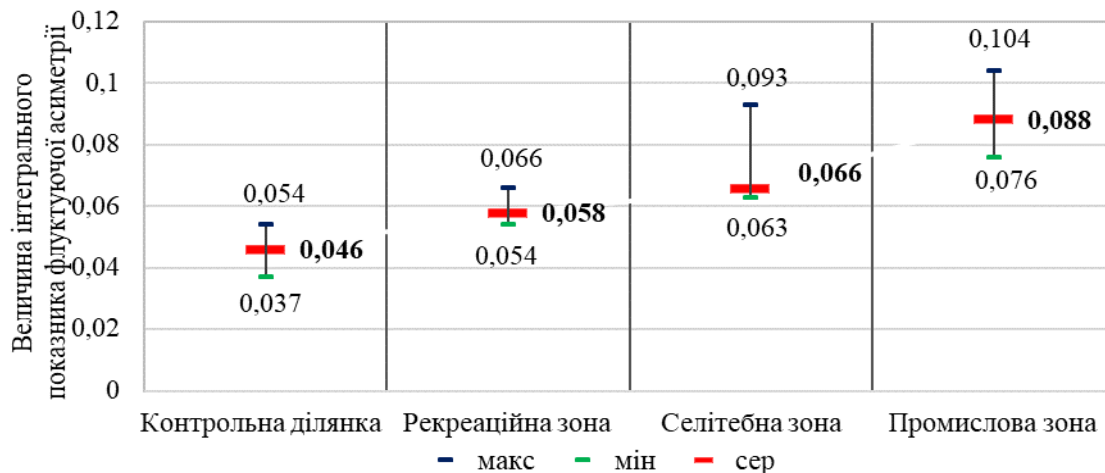


Рис. 3. Розподіл інтегрального показника флюктуючої асиметрії листа деревних рослин виду *Populus canadensis*, відповідно до зон їх зростання (рекреаційна, селітебна, промислова зони) на території м. Кам'янське (2023 р.)

Як видно з діаграми, наведеної на рис. 3, визначені інтегральні показники не відрізняються стабільністю для всіх досліджених функціональних зон міста, на що вказує розбіжність значення інтегрального показника від мінімального до максимального в кожній зоні. Так, наприклад, розбіжність коливається в межах 15—17 % від середнього значення у промисловій зоні та контрольній точці відбору матеріалу. Даний факт вказує на сталий вплив пригнічуваних чи навпаки, сприятливих умов для зростання рослин, що відповідно характеризує якість екологічного стану відповідних територій. Проте коливання усередненого інтегрального показника для рекреаційних та селітебних зон в межах 6—14 % та 4—40 % відповідно, свідчить про періодичність техногенного впливу у зазначених зонах та відмінність у потужності впливу в залежності від їх наближення до епіцентру впливу, особливо для селітебної зони. Виявлена тенденція вказує на небезпеку для населення міста, що мешкає в селітебних зонах, розташованих у достатній близькості до промислових об'єктів особливо в Південному адміністративному районі міста (див. рис. 2). У лівобережній частині міста селітебні зони мінімально піддаються впливу промислових підприємств, що позначається мінімальним відхиленням від усередненої норми, проте відчувають навантаження від транспортної інфраструктури міста.

Як було зазначено вище, інтегральні показники флюктуючої асиметрії листа рослин виду *Populus canadensis* для м. Кам'янське визначались інтервально впродовж 10 років та їх усереднені значення коливались в межах:

- у 2013 р. від 0,04 до 0,109;
- у 2015 р. від 0,04 до 0,103;
- у 2017 р. від 0,038 до 0,106;
- у 2023 р. від 0,037 до 0,104.

Отже, усереднений інтегральний показник асиметрії листа коливається від 0,037 до 0,106. Представлені на рис. 4 для відповідного року спостереження кожен з набору даних має куполоподібну форму за розподілом Гауса-Лапласа, що підтверджує нормальний розподіл даних та підтверджує можливість використання даного методу фітоіндикації для екологічного моніторингу.

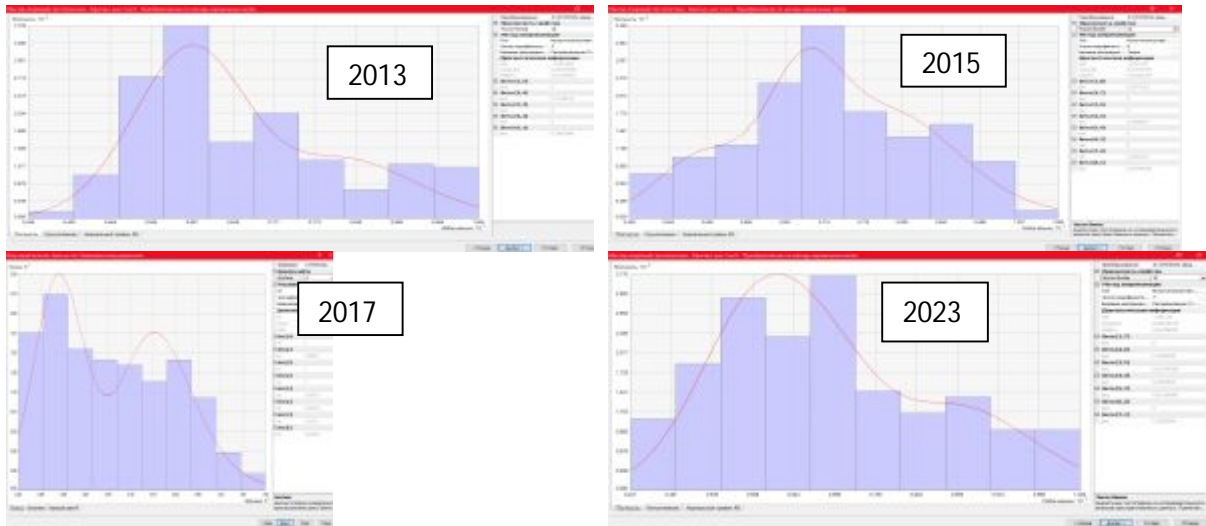


Рис. 4. Діаграми розподілу усередненого інтегрального показника асиметрії листа рослин виду *Populus canadensis* для відповідних років дослідження на території м. Кам'янське

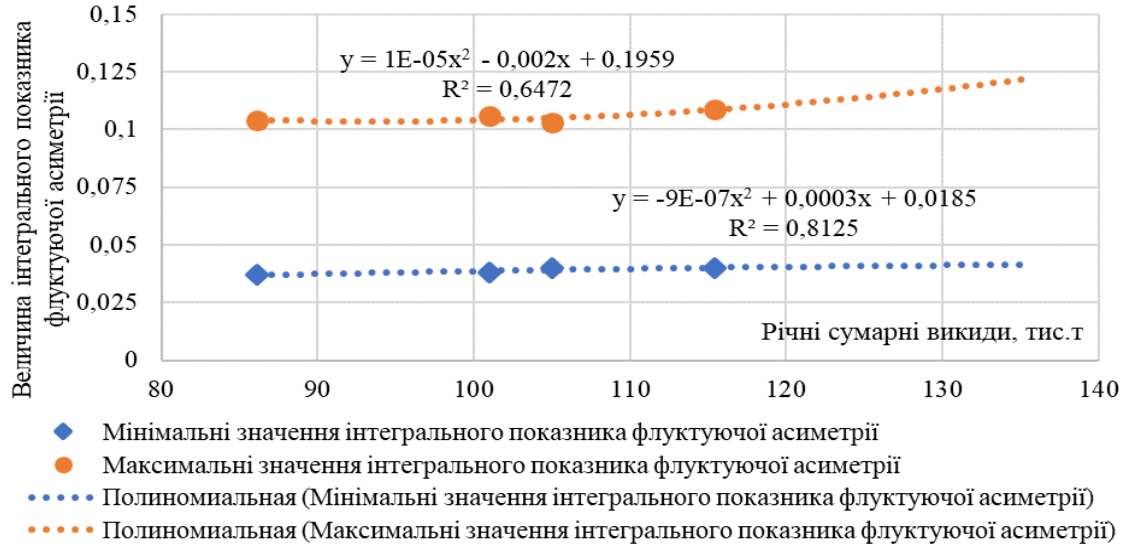


Рис. 5. Графічні та математичні моделі залежності інтегрального показника флуктуючої асиметрії від загальних річних викидів в атмосферу забруднюючих речовин для м. Кам'янське

Враховуючи адекватність отриманих результатів багаторічних спостережень інтегрального показника флуктуючої асиметрії листової пластини рослин виду *Populus canadensis*, провели перевірку співвідношення розрахованих показників та загальнорічних викидів в атмосферу забруднюючих речовин у відповідні роки (рис. 5). В результаті статистичної обробки даних встановлено тісний кореляційний зв'язок між розрахованими інтегральними показниками флуктуючої асиметрії та річними викидами в атмосферу забруднюючих речовин, достовірність якого підтверджується високими коефіцієнтами кореляції $r = 0,8 \pm 0,9$ при рівні значимості $p < 0,05$. Змодельовані тренди полі-

номіального характеру другого порядку згідно до яких прогнозується подальше зростання інтегрального показника флюктуючої асиметрії в залежності від збільшення обсягу викидів забруднюючих речовин. Слід звернути увагу на стрімкий зріст максимальних значень інтегрального показника в залежності від обсягів забруднення, що підтверджує загострення екологічної небезпеки в промислових та транспортних зонах урбосистеми. Однак у зонах з мінімальним техногенним навантаженням також спостерігається незначне погіршення якості навколишнього середовища.

Результати проведеного моделювання підтверджують адекватність методу флюктуючої асиметрії листової пластини в якості альтернативного та перспективного методу екологічного моніторингу урбосистеми. Проведення оцінки якості навколишнього середовища за інтегральними показниками флюктуючої асиметрії дозволить визначити стан довкілля враховуючи вплив попередніх та дію поточних екологічних чинників як для цілісної урбосистеми, так і окремих її функціональних зон. З урахуванням накопичувальної особливості даного показника за вегетаційний період при його використанні варто акцентувати увагу на забрудненні не тільки окремих територій чи функціональних зон, а робити прогнози щодо подальшого відновлення якості довкілля, зокрема з використанням методів фітореємедіації.

Результати проведеного моделювання підтверджують адекватність методу флюктуючої асиметрії листової пластини в якості альтернативного та перспективного методу екологічного моніторингу урбосистеми. Проведення оцінки якості навколишнього середовища за інтегральними показниками флюктуючої асиметрії дозволить визначити стан довкілля враховуючи вплив попередніх та дію поточних екологічних чинників як для цілісної урбосистеми, так і окремих її функціональних зон. З урахуванням накопичувальної особливості даного показника за вегетаційний період при його використанні варто акцентувати увагу на забрудненні не тільки окремих територій чи функціональних зон, а робити прогнози щодо подальшого відновлення якості довкілля, зокрема з використанням методів фітореємедіації.

В ході застосування методу фітореємедіації використовуються природні процеси, що відбуваються в рослині. Цей метод не вимагає використання додаткового обладнання і трудових ресурсів, оскільки процес очищення відбувається самими рослинами. Також для відновлення компонентів довкілля за допомогою цього методу не потрібно здійснювати масштабні процеси з переміщення забруднених ґрунтів, чи навантажувати урбосистему тимчасовими незручностями в результаті проведення технічних заходів з її відновлення. Рослини-фітореємедіанти, за умов їх слушного та грамотного використання є ефективними інструментами для очищення навколишнього середовища від забруднюючих речовин, таких як важкі метали, хімічні сполуки і навіть радіоактивні речовини. Принцип роботи рослин-фітореємедіантів ґрунтується на їхній природній здатності до абсорбції та акумуляції цих забруднюючих речовин з навколишнього середовища.

Фітореємедіація має успішний досвід застосування. Відомі світові практики очищення міського ґрунту у недорогий та екологічний спосіб від забруднення миш'яком, свинцем, ртуттю інших органічних та неорганічних забруднювачів за допомогою декоративних та аборигенних видів рослин [28—30].

Таким чином, до системи екологічного моніторингу м. Кам'янське слід долучити окрім стандартних методів інструментального аналізу оцінки якості навколишнього середовища методи фітоіндикації, зокрема із застосуванням інтегрального показника флюктуючої асиметрії листової пластинки деревних рослин виду *Populus canadensis* (Тополя канадська).

Висновки

Проведено аналіз публікацій щодо доцільності застосування методів фітоіндикації для визначення антропогенного навантаження на урбосистему. Визначено, що оцінка стану довкілля за інтегральним показником флюктуючої асиметрії відрізняється достатньою достовірністю, тому використовується для екологічного моніторингу техногенно навантажених територій.

Опрацьовано методу оцінки якості навколишнього середовища за інтегральним показником флюктуючої асиметрії листової пластини. Враховуючи накопичений масив даних багаторічних спостережень та досвід науковців щодо чутливості до техногенного навантаження певних родів деревних рослин, запропоновано ввести шкалу оцінювання інтегрального показника флюктуючої асиметрії рослин для роду *Populus*, яка відрізняється від оригінальної шкали

для рослин роду *Betula* значеннями градієнтів та дозволяє адекватно оцінити стан довкілля та потужність впливу екологічних факторів.

Закладено 30 дослідних ділянок розміром 1 км², які рівномірно розподілені територією м. Кам'янське та максимально охоплюють найбільш потужні промислові, транспортні, селітебні та рекреаційні зони. Проведено збір листових пластин рослин виду *Populus canadensis* з кожної дослідної ділянки та розраховано інтегральний показник флуктуючої асиметрії для кожної вибірки. Встановлено, що в межах промислових зон та транспортних магістралей рослини зростають у вкрай несприятливих умовах та перебувають у сильно пригніченому стані, що характеризується усередненою величиною асиметрії **0,088**. Високий показник асиметрії **0,066** характерний для рослин, які зростають в межах селітебних зон, що свідчить про значний рівень забруднення навколишнього середовища в цих функціональних зонах. Усереднений інтегральний показник асиметрії листа рекреаційних зон дорівнює **0,058**, що свідчить про умовну норму щодо забруднення навколишнього середовища. Для контрольної зони (природний заповідник «Дніпровсько-Орільський») величина асиметрії дорівнює **0,046**.

Значення інтегральних показників мають розбіжність для всіх функціональних зон міста, яка для промислових та рекреаційних зон коливається в межах 15 %, що свідчить про сталий та постійний режим впливу. Встановлено, що рослини селітебних зон відчувають періодичний режим техногенного впливу, що підтверджується коливанням показника до 40 %, а потужність впливу залежить від відстані до джерела забруднення.

Проведено порівняння результатів усередненого інтегрального показника асиметрії листа рослин виду *Populus canadensis*, інтервально визначена за десятирічний період (2013—2023 рр.) для м. Кам'янське та встановлена нижня ($0,038 \pm 0,002$) та верхня ($0,106 \pm 0,003$) межа показника, що не суттєво змінюється впродовж дослідного інтервалу часу, проте залежить від інтенсивності антропогенного впливу, зокрема обсягів викидів в атмосферу забруднюючих речовин. Достовірність кореляційного зв'язку між розрахованими інтегральними показниками флуктуючої асиметрії та річними викидами в атмосферу забруднюючих речовин підтверджується високими коефіцієнтами кореляції $r = 0,8\text{—}0,9$ при рівні значимості $p < 0,05$. Змодельовані тренди поліноміального характеру прогнозують подальше зростання інтегрального показника флуктуючої асиметрії в залежності від збільшення обсягу викидів забруднюючих речовин, що вказує на зростання екологічної небезпеки в промислових та транспортних зонах урбосистеми.

Підсумовано, що до системи екологічного моніторингу м. Кам'янське поруч зі стандартними методами інструментального аналізу оцінки якості навколишнього середовища варто застосовувати методи фітоіндикації, зокрема із застосуванням інтегрального показника флуктуючої асиметрії листової пластинки деревних рослин виду *Populus canadensis* (Тополя канадська).

Список використаної літератури

1. Аналітична інформація про екологічний стан міста Кам'янського та стан виконання природоохоронних заходів Екологічної програми міста Кам'янського на 2016–2020 роки. Рішення Кам'янської міської ради від 18.12.2020 №61-03/VIII.
https://so.kam.gov.ua/ua/treezas_so/pg/301220811663151_d1/tpviewr/2/
2. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2022 рік.
<https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/Pro%20oblast/Ekolo%20h%20ii%20Rehionalna%20dopovid%20ta%20Ekolohichni%20pasport/Rehionalna%20dopovid%20pro%20stan%20navkolyshnoho%20pryro%20dnoho%20seredovyscha%20v%20Dnpr.obl./Rehionalna%20dopovid%20pro%20stan%20navkolyshnoho%20pryro%20dnoho%20seredovyscha%20v%20Dnpr.obl.%202022.pdf>
3. Кремінь В.А., Непошивайленко Н.О., Гуляев В.М., Гунько С.О. Порівняння результатів комплексного екологічного моніторингу м. Кам'янське при застосуванні різних методів вимірювань //Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2023. 1 (42). С. 147–157. doi: 10.31319/2519-2884.42.2023.18.

4. Непошивайленко Н.О., Зберовський О.В., Карпенко О.О., Галата А.В., Клименко Т.К. Комплексні дослідження стану довкілля на території міста Дніпродзержинська з використанням ГІС-технологій // Збірник наукових праць НГУ. 2011. 36(1). С. 177–183.
5. Багрій І.Д., Білоус А.М., Вилкул Ю.Г., Гожик П.Ф. Досвід комплексної оцінки та картографування факторів техногенного впливу на природне середовище міст Кривого Рогу та Дніпродзержинська. Київ: Фенікс, 2000.
6. Лялюк-Вітер Г.Д., Навроцька В. Флуктуюча асиметрія, як один з методів біоіндикації // Science and technology: problems, prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2023. P. 16-18. <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-technology-problems-prospects-and-innovations-8-10-06-2023-osaka-yaponiya-arhiv/>
7. Дідух Я.П. Основи біоіндикації. Київ: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2012. 344 с.
8. Graham J.H. Fluctuating Asymmetry and Developmental Instability, a Guide to Best Practice. *Symmetry*. 2021, 13, 9. doi.org/10.3390/sym13010009.
9. Van Valen, L. A study of fluctuating asymmetry. *Evolution* 1962, 16, 125–142.
10. Palmer A.R.; Strobeck C. Fluctuating asymmetry: Measurement, analysis, patterns. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1986, 17, 391–421.
11. Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry analyses revisited. In *Developmental Instability: Causes and Consequences*; Polak, M., Ed.; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2003. P. 279–319.
12. Tobias M. Sandner, Vitali Zverev, Mikhail V. Kozlov, Can the use of landmarks improve the suitability of fluctuating asymmetry in plant leaves as an indicator of stress?, *Ecological Indicators*, 2019. Volume 97, P. 457–465, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.10.038. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X18308112>
13. Mikhail V. Kozlov, Vitali Zverev, Elena L. Zvereva, Leaf size is more sensitive than leaf fluctuating asymmetry as an indicator of plant stress caused by simulated herbivory, *Ecological Indicators*, 2022. Volume 140, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108970. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X22004411>
14. Shadrina E., Soldatova V., Turmukhmetova N. Fluctuating Asymmetry as a Measure of Stress in Natural Populations of Woody Plants: Influence of Ecological and Geographical Factors on Developmental Stability. *Symmetry*. 2023, 15, 700. doi: 10.3390/sym15030700
15. Семак У.Й. Вплив факторів техногенного трансформованого середовища на рівень флуктуючої асиметрії листкових пластинок деревних рослин // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія, 2020, Вип. 48, С. 28–33. doi: 10.24144/1998-6475.2020.48.28-33
16. Петрушкевич Ю.М. Вплив промислових умов на величину флуктуючої асиметрії литкової пластинки *Betula pendula* // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія Біологія, 2018. №1 (72), С. 82–89 <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/9608>
17. Прищепя А.М., Борщевська І.М., Буднік З.М., Брежицька О.А., Курилюк О.М. Біоіндикаційна оцінка стану повітряного середовища міста рівного на основі аналізу флуктуючої асиметрії // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія Сільськогосподарські науки. 2017. Том 4 № 80. С. 30–38. <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/agri/article/view/199>
18. Руденко С.С., Махрова Є.Г. Особливості дослідження флуктуючої асиметрії листків деревних порід за імітації техногенних чинників у мікрокосмах (на прикладі *Quercus robur L.*) // Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи). 2009. Т. 1, Вип. 1. С. 27-34.
19. Кравченко О.І., Негалюк А. В., Непошивайленко Н.О., Карпенко О.О. Геоінформаційний моніторинг промислової урбосистеми, заснований на результатах біоіндикації розвитку рослин роду *Populus* // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії: Збірник наукових праць. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. Вип. 19. С. 53–57.

20. Орбчук К.В., Непошивайленко Н.О. Застосування білатеральних морфологічних ознак різних деревних рослин в оцінці якості навколишнього середовища // Рослини та урбанізація. Матеріали п'ятої Міжнародної науково-практичної конференції Дніпропетровськ, 16–17 лютого 2016. С. 90-92.
21. Бессонова В.П., Чонгова А.С. Морфометричні показники деревних рослин в індикації забруднення довкілля // *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2023. № 1(46). С. 102–108. doi: 10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.18
22. Гаврикова В.С. Біоіндикація урбосередовища за показником флуктуючої асиметрії дерев *Acer saccharinum L.* // *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2014. № 6. С. 77–81.
23. Розроблення плану зонування території м. Дніпродзержинськ, Дніпропетровської області: Пояснювальна записка / ТОВ «ІНСТИТУТ ХАРКІВПРОЕКТ». Харків, 2013. 149 с.
24. Гуляев В., Непошивайленко Н. Звіт про науково-дослідну роботу «Розробка комплексної програми озеленення міста Дніпродзержинська на 2011–2015 роки». Тема № 362/10. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 69с.
25. Zakharov V.M., Shkyl F.N., Kriazheva N.H. Otsenka stabilnosti razvitiya berezy v raznykh chastiakh areala. *Vestnik Nizhehorodskogo universiteta im. N.N. Lobachevskogo. Seriya Biologiya*, 2005. 1(9). С. 77–84.
26. Орбчук К.В., Непошивайленко Н.О. Геоінформаційна оцінка озеленення території міста Дніпродзержинська // Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 4–6 листопада 2015. С. 167–168.
27. Орбчук К.В., Непошивайленко Н.О., Горай І.В. Оцінка ефективності озеленення територій міста Кам'янське геоінформаційними методами *The scientific heritage – Budapest, Hungary*, 2016. № 7 (7), P.3. P. 105–109.
28. Arnab Majumdar, Munish Kumar Upadhyay, Megha Ojha, Fathima Afsal, Biswajit Giri, Sudhakar Srivastava, Sutapa Bose Enhanced phytoremediation of Metal(loid)s via spiked ZVI nanoparticles: An urban clean-up strategy with ornamental plants, *Chemosphere*, 2022. Volume 288, Part 2 doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132588.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521030605>
29. Ahmadpour P., Ahmadpour F., Mahmud T. M. M., Abdu A., Soleimani M., & Tayefeh, F. H. (). Phytoremediation of heavy metals: A green technology. *African Journal of Biotechnology*. 2012. 11(76). P. 14036–14043. doi: 10.5897/AJB12.459
30. Phang LY., Mohammadi M. & Mingyuan L. Underutilised Plants as Potential Phytoremediators for Inorganic Pollutants Decontamination. *Water Air Soil Pollut.* 2023. 234, 306 doi: 10.1007/s11270-023-06322-8

APPLICATION OF FLUCTUATING ASYMMETRY METHODS FOR ENVIRONMENTAL MONITORING IN KAMIANSKE

Abstract

The city of Kamianske has a hazardous environmental situation due to the long and intensive development of industry, whose enterprises emit large amounts of harmful substances into the atmosphere. Therefore, the implementation of continuous environmental monitoring for the city is an urgent task that can be solved by combining instrumental measurement methods with phytoindication methods. The aim of the study is to test the methods of phytoindication in the environmental monitoring system using the indicator of fluctuating asymmetry of the leaf blade of woody plants of the *Populus canadensis* species and to assess the quality of the environment, taking into account the functional zones of the urban system. A methodology for assessing the quality of the environment by the integral index of the fluctuating asymmetry of the leaf blade of *Populus* plants has been developed and an assessment scale with different gradient values has been proposed. The integral indicator of the fluctuating asymmetry of the leaf blades of *Populus canadensis* plants was calculated for 30 experimental plots covering all functional zones of Kamianske. It was determined that the quality of the environment

within the industrial zones is characterised as critically polluted with unfavourable conditions for living organisms, which is confirmed by the integral index of fluctuating asymmetry $0,076 \pm 0,104$. Settlement areas are characterised as polluted, with an integral index of $0,063 \pm 0,093$. In recreational areas, the state of the environment is assessed by a conditional norm of $0,054 \pm 0,066$. The results of the average integral index of leaf asymmetry of *Populus canadensi* plants for a ten-year period for the city of Kamianske were compared, and the lower ($0,038 \pm 0,002$) and upper ($0,106 \pm 0,003$) limits of the index were determined. The dependence of the integral indicator on the volume of pollutant emissions into the atmosphere has been established, which is confirmed by high correlation coefficients $r = 0,8 \pm 0,9$ at a significance level of $p < 0,05$. The modelled polynomial trends predict further growth of the integral indicator of fluctuating asymmetry depending on the increase in pollutant emissions.

References

- [1] Analitichna informatsiia pro ekolohichni stan mista Kamianskoho ta stan vykonannya pryrodookhoronnykh zakhodiv Ekolohichnoj prohramy mista Kamianskoho na 2016–2020 roky. Rishennia Kamianskoi miskoi rady vid 18.12.2020 №61-03/VIII (2020) [*Analytical information on the environmental status of Kamianske and the status of implementation of environmental protection measures of the Environmental Programme of Kamianske for 2016-2020. Decision of the Kamianske City Council of 18.12.2020 No. 61-03/VIII*]. Kamianske. https://so.kam.gov.ua/ua/treezas_so/pg/301220811663151_d1/tpviewr/2/ (in Ukrainian).
- [2] Rehionalna dopovid pro stan navkolynshnoho pryrodnoho seredovyscha v Dnipropetrovskii oblasti za 2022 rik (2023) [*Regional report on the state of the environment in the Dnipro region for 2022*]. Dnipro. 309 p. (in Ukrainian).
- [3] Kremin, V.A., Neposhyvailenko, N.O., Hulciaiev, V.M., Hunko, S.O. (2023). *Porivniannia rezultativ kompleksnoho ekolohichnoho monitorynhu m. Kamianske pry zastosuvanni riznykh metodiv vymiriuvan* [*Comparison of the results of integrated environmental monitoring in Kamianske using different measurement methods*]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu (tekhnicni nauky) – Collection of scientific papers of Dnipro State Technical University (technical sciences)*, №1(42), P. 147–157. doi.: 10.31319/2519-2884.42.2023.18 (in Ukrainian).
- [4] Neposhyvailenko, N.O., Zberovskyi, O.V., Karpenko, O.O., Halata A.V., Klymenko, T.K. (2011). *Kompleksni doslidzhennia stanu dovkillia na terytorii mista Dniprodzerzhynska z vykorystanniam HIS-tekhnologii* [*Comprehensive studies of the state of the environment in the city of Dniprodzerzhynsk using GIS technologies*]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU – Collection of scientific works of the National State University*, 36(1), P. 177–183 (in Ukrainian).
- [5] Bahrii, I.D., Bilous, A.M., Vylkul, Yu.H., Hozhyk, P.F. (2000). *Dosvid kompleksnoi otsinky ta kartohrafuvannia faktoriv tekhnohennoho vplyvu na pryrodne seredovysche mist Kryvoho Rohu ta Dniprodzerzhynska*. [*Experience of Comprehensive Assessment and Mapping of Factors of Technogenic Impact on the Natural Environment of Kryvyi Rih and Dniprodzerzhynsk*]. Kyiv: Feniks (in Ukrainian).
- [6] Lialiuk-Viter, H.D., Navrotska, V. (2023). *Fluktuiucha asymetriia, yak ody z metodiv bioindykatsii* [*Fluctuation asymmetry as one of the bioindication methods*]. *Science and technology: problems, prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference*. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2023. P. 16–18 (in Ukrainian) <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-technology-problems-prospects-and-innovations-8-10-06-2023-osaka-yaponiya-arhiv/>
- [7] Didukh, Ya.P. (2012). *Osnovy bioindykatsii* [*Fundamentals of bioindication*]. Kyiv: NVP «Vydavnytstvo «Naukova dumka» NAN Ukrainy» – Kyiv: Scientific and Research Publishing House "Naukova Dumka" of the National Academy of Sciences of Ukraine. 344p. (in Ukrainian).
- [8] Graham, J.H. (2021). *Fluctuating Asymmetry and Developmental Instability, a Guide to Best Practice*. *Symmetry*, 13, 9. doi:10.3390/sym13010009 (in English).
- [9] Van Valen, L. (1962). *A study of fluctuating asymmetry*. *Evolution*, 16, P. 125–142 (in English).

- [10] Palmer, A.R.; Strobeck, C. (1986). *Fluctuating asymmetry: Measurement, analysis, patterns*. Annu. Rev. Ecol. Syst., P. 17, 391–421 (in English).
- [11] Palmer, A.R.; Strobeck, C. (2003). *Fluctuating asymmetry analyses revisited*. In *Developmental Instability: Causes and Consequences*; Polak, M., Ed.; Oxford University Press: New York, NY, USA, P. 279–319 (in English).
- [12] Tobias M. Sandner, Vitali Zverev, Mikhail V. Kozlov (2019). *Can the use of landmarks improve the suitability of fluctuating asymmetry in plant leaves as an indicator of stress?*. Ecological Indicators, Volume 97, pp. 457–465, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.10.038 (in English).
- [13] Mikhail V. Kozlov, Vitali Zverev, Elena L. Zvereva (2022). *Leaf size is more sensitive than leaf fluctuating asymmetry as an indicator of plant stress caused by simulated herbivory*. Ecological Indicators, Volume 140, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108970 (in English).
- [14] Shadrina, E.; Soldatova, V.; Turmukhmetova, N. (2023). *Fluctuating Asymmetry as a Measure of Stress in Natural Populations of Woody Plants: Influence of Ecological and Geographical Factors on Developmental Stability*. Symmetry, 15, 700. doi: 10.3390/sym15030700 (in English).
- [15] Semak, U.I. (2020). *Vplyv faktoriv tekhnohennoho transformovanoho seredovyshcha na riven fluktuiuchoi asymetrii lystkovykh plastynok derevnykh roslyn [Influence of factors of technogenic transformed environment on the level of fluctuating asymmetry of leaf blades of woody plants]*. Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu – Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series Biology, Vol. 48, 28–33. doi: 10.24144/1998-6475.2020.48.28-33 (in Ukrainian).
- [16] Petrushkevych, Yu.M. (2018). *Vplyv promyslovykh umov na velychynu fluktuiuchoi asymetrii lytkovoi plastynky Betula pendula [Influence of industrial conditions on the value of fluctuating asymmetry of the calf plate of Betula pendula]*. Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Seriiia Biolohiia – Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series Biology, №1 (72), P. 82–89 <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/9608> (in Ukrainian).
- [17] Pryshchepa, A. M., Borshchevska I. M., Budnik Z. M., Brezhytska O. A., Kuryliuk O. M. (2017). *Bioindykatsiina otsinka stanu povitrianoho seredovyshcha mista rivnoho na osnovi analizu fluktuiuchoi asymetrii [Bioindicative assessment of the air environment in the city of Rivne based on the analysis of fluctuating asymmetry]*. Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Seriiia Silskohospodarski nauky – Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management. Series Agricultural Sciences. Vol. 4 No. 80 (2017). P. 30–38. <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/agri/article/view/199> (in Ukrainian).
- [18] Rudenko, S.S., Makhrova, Ye.H. (2009). *Osoblyvosti doslidzhennia fluktuiuchoi asymetrii lystkiv derevnykh porid za imitatsii tekhnohennykh chynnykiv u mikrokosmakh (na prykladi Quercus robur l.) [Peculiarities of studying the fluctuating asymmetry of tree leaves under imitation of anthropogenic factors in microcosms (on the example of Quercus robur l.)]*. Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu. Biolohiia (Biolohichni systemy) – Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Biology (Biological systems). Vol. 1, Issue 1. P. 27–34 (in Ukrainian).
- [19] Kravchenko, O.I., Nehaliuk, A.V., Neposhyvailenko, N.O., Karpenko, O.O. (2014). *Heoinformatsiinyi monitorynh promyslovoi urbosystemy, zasnovanyi na rezultatakh bioindykatsii rozvytku roslyn rodu Ropulus [Geoinformation monitoring of the industrial urban system based on the results of bioindication of the development of plants of the genus Populus]*. Problemy bezperervnoi heohrafichnoi osvity i kartohrafii: Zbirnyk naukovykh prats – Problems of continuous geographical education and cartography: Collection of scientific papers. Issue 19. P. 53–57 (in Ukrainian).
- [20] Orobchuk, K.V., Neposhyvailenko, N.O. (2016). *Zastosuvannia bilateralnykh morfolohichnykh oznak riznykh derevnykh roslyn v otsintsi yakosti navkolyshnoho seredovyshcha [The use of bilateral morphological characters of different woody plants in environmental quality assessment]*. Roslyny ta urbanizatsiia. Materialy piatoi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Plants and urbanisation. Materials of the Fifth International Scientific and Practical Conference. Dnipro. P. 90–92 (in Ukrainian).
- [21] Bessonova, V.P., Chonhova, A.S. (2023). *Morfometrychni pokaznyky derevnykh roslyn v indykatsii zabrudnennia dovkillia [Morphometric indicators of woody plants in the indication of environmental pollution]*. Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal – Ecological Sciences: a

- scientific and practical journal. № 1(46). P. 102–108. doi: 10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.18 (in Ukrainian).
- [22] Havrykova, V.S. (2014). *Bioindykatsiia urboseredovyshcha za pokaznykom fluktuiuchoi asymetrii derev Acer saccharinum L [Bioindication of the urban environment by the indicator of fluctuating asymmetry of Acer saccharinum L. trees]*. Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal – Ecological sciences: a scientific and practical journal. № 6. P. 77–81 (in Ukrainian).
- [23] Rozroblennia planu zonuвання terytorii m. Dniprodzerzhynsk, Dnipropetrovskoi oblasti: Poiasniuvalna zapyska (2013) [Development of a zoning plan for the territory of Dniprodzerzhynsk, Dnipropetrovska oblast: Explanatory note]. INSTITUTE KHARKIVPROEKT LLC. Kharkiv. 149 p. (in Ukrainian).
- [24] Huliaiev, V., Neposhyvailenko, N. (2011). *Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Rozrobka kompleksnoi prohramy ozelenennia mista Dniprodzerzhynska na 2011 – 2015 roky». Tema № 362/10 [Report on the research work "Development of a comprehensive greening programme for the city of Dniprodzerzhynsk for 2011-2015". Theme No. 362/10]*. Dniprodzerzhynsk: DGTU. 69 p. (in Ukrainian).
- [25] Zakharov, V.M., Shkyl, F.N., Kriazheva, N.H. (2005) *Otsenka stabilnosti rozvitiya berezy v raznykh chastiakh areala*. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.N. Lobachevskogo. Seriya Biologiya, 1(9). P. 77–84 (in English).
- [26] Orobchuk, K.V., Neposhyvailenko, N.O. (2015). *Heoinformatsiina otsinka ozelenennia terytorii mista Dniprodzerzhynska [Geoinformation assessment of greening of the territory of the city of Dniprodzerzhynsk]*. Ekolohichna bezpeka yak osnova staloho rozvytku suspilstva. Yevropeiskyi dosvid i perspektyvy – Environmental safety as a basis for sustainable development of society. European experience and prospects. Lviv. P. 167–168 (in Ukrainian).
- [27] Orobchuk, K.V., Neposhyvailenko, N.O., Horai, I.V. (2016). *Otsinka efektyvnosti ozelenennia terytorii mista Kamianske heoinformatsiinymy metodamy [Evaluation of the effectiveness of greening the territories of the city of Kamenskoye by geoinformation methods]*. The scientific heritage № 7 (7), P.3. Hungary. P. 105–109 (in Ukrainian).
- [28] Arnab Majumdar, Munish Kumar Upadhyay, Megha Ojha, Fathima Afsal, Biswajit Giri, Sudhakar Srivastava, Sutapa Bose (2022). *Enhanced phytoremediation of Metal(loid)s via spiked ZVI nanoparticles: An urban clean-up strategy with ornamental plants*. Chemosphere. Volume 288, Part 2, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132588 (in English).
- [29] Ahmadpour, P., Ahmadpour, F., Mahmud, T.M., Abdu, A., Soleimani, M., & Tayefeh, F.H. (2012). *Phytoremediation of heavy metals: A green technology*. African Journal of Biotechnology, 11(76), P. 14036–14043. doi: 10.5897/AJB12.459 (in English).
- [30] Phang, L.Y., Mohammadi, M. & Mingyuan, L. (2023). *Underutilised Plants as Potential Phytoremediators for Inorganic Pollutants Decontamination*. Water Air Soil Pollut P. 234–306. doi: 10.1007/s11270-023-06322-8 (in English).

Надійшла до редакції 08.11.2023