

УДК 504.064.4:57.089.2:528.94

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-05>

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ СКРИНІНГ ПАЛИНОТОКСИЧНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНИХ ВИКИДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БІОІНДИКАТОРІВ І ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

Морозова Т.В.

Державна наукова установа «Інститут екологічного
відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, Київ
erdu@urk.net

Анотація. У статті представлено результати просторово-часового скринінгу палинотоксичності автотранспортних викидів у міському середовищі із застосуванням трьох біоіндикаторних видів рослин (*Cerasus vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* F. Web., *Tussilago farfara* L.). Метою дослідження було визначення характеру морфометричних змін пилкових зерен і рівня їх стерильності під впливом діоксиду карбону та супутніх техногенних чинників. Установлено, що види реагують на забруднення по-різному: *C. vulgaris* характеризується істотним зменшенням довжини та ширини пилкових зерен; для *T. officinale* найбільш показовим є зростання рівня індукованої стерильності за незначних морфометричних коливань; *T. farfara* демонструє зменшення розмірів навіть фертильних пилкових зерен, що свідчить про високу чутливість цього виду до дії аерополітантів.

Кореляційний аналіз виявив пряму залежність середнього рівня між концентрацією CO₂ та часткою безкрохмальних пилкових зерен усіх досліджених видів, а також зворотну залежність між концентрацією CO₂ та довжиною пилку. Це підтверджує, що морфометричні параметри й рівень стерильності пилку функціонують як взаємодоповнювальні маркери палинотоксичності. Отримані дані свідчать

про перспективність використання пильцевого методу для оперативної діагностики аеротехногенного навантаження в умовах інтенсивного автотрафіку. Показано ефективність інтеграції результатів біоіндикації з геоінформаційним аналізом для формування локальних карт палинотоксичності, виявлення критичних ділянок міського простору та оптимізації структурно-ландшафтного планування. Найчутливішими до впливу автотранспортних викидів виявилися *T. officinale* та *T. farfara*, що визначає їхній потенціал у розвитку системи біосурвейлансу урбанізованих територій.

Ключові слова: палинотоксичність; автотранспортні викиди; оксид карбону (II); пильцевий тест; біоіндикація; стерильність пилку; морфометрія пилку; просторово-часовий скринінг; аеротехногенне навантаження; GIS-картографування.

Spatio-temporal screening of fuel toxicity of motor vehicle emissions using bioindicators and gis technologies Morozova T.V.

State Scientific Institution “Institute of Ecological Restoration and Development of Ukraine”

Abstract The study presents the results of a spatiotemporal screening of pollen toxicity

caused by vehicle emissions in an urban environment, using three plant species as bioindicators: *Cerasus vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* F. Web., and *Tussilago farfara* L. The research aimed to assess changes in pollen morphology and the proportion of sterile pollen grains under the influence of carbon dioxide (CO₂) and related anthropogenic stressors. The species demonstrated different sensitivity patterns: *C. vulgaris* showed a pronounced reduction in pollen length and width; *T. officinale* exhibited a significant increase in induced sterility with only minor morphometric variations; *T. farfara* responded with a notable decrease in the size of even fertile pollen grains, indicating elevated susceptibility to aerotechnogenic pollution.

Correlation analysis revealed a direct relationship between CO₂ concentration and the proportion of starchless (sterile) pollen grains across all species, as well as an inverse relationship between CO₂ concentration and pollen length. These findings indicate that both pollen sterility and morphometric characteristics function as complementary markers of pollen toxicity. The obtained results confirm the diagnostic potential of the pollen-based bioindication method for assessing air pollution caused by vehicle emissions.

The integration of bioindicator data with GIS analysis proved effective for mapping local gradients of pollen toxicity, identifying critical zones within the urban landscape, and supporting environmentally oriented spatial planning. Among the analyzed species, *T. officinale* and *T. farfara* were identified as the most sensitive to elevated CO₂ levels, highlighting their value for further development of urban biosurveillance systems.

Keywords: baseline studies, ESIA, EIA, wind energy, birds, bats, biodiversity, GIS modeling, collision risk model, environmental monitoring, Ukraine.

Забруднення довкілля токсикантами техногенного походження протягом останніх десятиліть набуло загрозливих

масштабів. Надходження до природних екосистем нехарактерних для них речовин становить пряму небезпеку для біоти. До основних антропогенних джерел забруднення навколишнього середовища належить автотранспорт. Дослідження численних авторів засвідчують, що компоненти автотранспортних викидів здатні негативно впливати на урожайність, спричиняти локальне забруднення довкілля та формувати небажані екологічні наслідки. Для їх запобігання необхідно проводити скринінг речовин, що входять до складу викидів, з метою визначення рівня їх токсичності для фітоценозів. У цьому контексті ефективно зарекомендував себе мікрогаметофітний аналіз.

Саме тому метою нашого дослідження стало оцінювання наслідків аеротехногенного забруднення довкілля автотранспортними викидами за їх гаметоцидним впливом на рослини, який проявляється у зростанні частки стерильних безкрахмальних пилкових зерен. Як зазначає Ібрагімова Е. Е., цей показник може слугувати індикатором мутагенної дії аерополітантів на репродуктивні органи рослин.

Для обґрунтування вибору літературних джерел та методологічних підходів до використання пилку як біоіндикатора було проаналізовано ключові публікації останніх років, які стосуються впливу антропогенних факторів, зокрема автотранспортних викидів, на морфологічні та репродуктивні характеристики пилку рослин. У таблиці 1 систематизовано рекомендовані джерела, їх тематику, тип забруднення та практичну цінність для дослідження. Це дозволяє чітко бачити, які методики та види рослин найчастіше застосовуються для біоіндикації стану атмосферного повітря в умовах урбанізованого середовища.

Таблиця 1

Використання пилку як біоіндикатора забруднення атмосферного повітря

Джерело / Автори / Назва	Тип забруднення / фактор впливу	Практична цінність для дослідження
<i>Pollution of the Environment and Pollen: A Review</i> (MDPI, 2020)	транспортні та промислові викиди	теоретичне обґрунтування використання пилку як біоіндикатора; висвітлює зміни морфології, стерильності та життєздатності пилку
<i>Impact of air pollution on reproductive biology of plants: Mechanisms and consequences</i> (Plant Stress, 2025)	загальне забруднення повітря	показує вплив забруднення на репродуктивну систему рослин, формування пилку, життєздатність; сучасна парадигма для методики дослідження
<i>Using of Taraxacum officinale (L.) pollens for the urban park bioindication</i> (Ukrainian Journal of Ecology, 2020)	міське антропогенне навантаження	демонструє залежність частки нежиттєздатного пилку від антропогенного навантаження; прямий приклад для вашого підходу
<i>Біоіндикація якості навколишнього середовища з використанням кульбаби лікарської (Taraxacum officinale Wigg.)</i> (Таврійський науковий вісник, 2024)	урбанізація, антропогенне забруднення	порівняння морфологічних ознак та абортивних пилкових зерен на ділянках з різним рівнем антропогенного впливу
<i>Еколого-біологічні особливості Taraxacum officinale Wigg за дії забруднення важкими металами в умовах промислового Криворіжжя</i> (2019)	важкі метали	методологія для оцінки змін пилку в умовах техногенного навантаження; корисно для порівняння впливу різних типів забруднення
<i>Using the pollen viability and morphology for fluoride pollution biomonitoring</i> (Journal of Environmental Quality / PubMed, 2011)	фториди та інші хімічні забруднювачі	демонструє чутливість пилку до різних типів забруднення; показує універсальність пильцевого методу для біоіндикації

Для біотестування екологічного стану приземного шару повітря на вулицях міста використано пилок трав'яних (*Taraxacum officinale* F. Web. ex Wigg., *Tussilago farfara* L.) та деревних рослин (*Cerasus vulgaris* Mill.). У цих видів визначали рівень спонтанної та індукованої стерильності пилкових зерен за стандартною методикою [6]. Пилок збирали в період масового цвітіння. Матеріалом слугували чоловічі суцвіття рослин, що зростають у придорожній зоні автошляхів з різною інтенсивністю транспортного

потoku. Контрольні зразки відбирали на території заказника загальнодержавного значення «Цецино». Фертильність пилкових зерен визначали йодним методом на тимчасових давлених препаратах; у кожному варіанті аналізували не менше ніж 2000 пилкових зерен. Морфологічну структуру зерен вивчали із застосуванням системи морфометричного аналізу зображень. Статистичну обробку даних виконували за допомогою пакета прикладних програм Microsoft Excel;

достовірність різниць оцінювали за t -критерієм Стьюдента.

За даними обласного статистичного управління [8], забруднення атмосферного повітря м. Чернівці формують як стаціонарні, так і пересувні джерела, причому 56,2 % загального обсягу шкідливих викидів припадає саме на пересувні джерела. Найбільше навантаження створює індивідуальний автотранспорт. У 2014 році ним в атмосферу було викинуто 28,75 тис. т забруднювальних речовин – на 1,3 тис. т більше, ніж у попередньому році. Зокрема, викиди включали 23 тис. т оксидів вуглецю (80 %), 3,74 тис. т вуглеводнів (13 %) та 1,73 тис. т оксидів азоту (6 %). У перерахунку на 1 км² площі міста щільність автотранспортних викидів становить 3,3 т.

З огляду на це нами проаналізовано інтенсивність руху автотранспорту та концентрацію оксиду вуглецю в повітрі на вулицях міста. Найбільша інтенсивність руху становила 1680 автомобілів на годину, найменша – 185 одиниць. Суттєво відрізняється і якісний склад транспортних потоків, що пов'язано з особливостями просторового розміщення вулиць. Найбільше навантаження припадає на легковий транспорт, особливо на центральних вулицях. Загальну оцінку завантаженості здійснено відповідно до ГОСТ 17.2.2.03-77: мінімальна кількість транспортних засобів становила 4565 автомобілів на добу, максимальна – 40 320.

Відомо, що інтенсивність руху та якісний склад автотранспорту визначають рівень забруднення атмосферного повітря. Подальший аналіз стосувався концентрації оксиду вуглецю у приземному шарі повітря. Встановлено, що рівень забруднення залишається високим: максимальна концентрація CO сягала 75,8 мг/м³, що у 15 разів перевищує ГДК. Такі показники можна пояснити як високою інтенсивністю руху (1640 авто/год), так і особливостями забудови – багатоповерхові будинки з обох боків вулиці, кільцеве перехрестя, розташування в центральній частині міста,

що зумовлює недостатню аерацію. На трьох центральних вулицях спостерігається ефект «аеродинамічної труби», який додатково посилює аеротехногенне забруднення.

Для наочного представлення просторової структури забруднення створено геоінформаційну карту, що відображає розподіл концентрацій оксиду вуглецю у приземному шарі повітря (рис. 1).

Таким чином, проведені нами дослідження засвідчили, що найвищий рівень забруднення оксидом вуглецю спостерігається у центральній частині міста та в промислових районах. Характерною особливістю є також підвищений вміст оксиду вуглецю на всій території міста. Отже, значна кількість автотранспорту, що рухається міськими вулицями, спричиняє погіршення якості атмосферного повітря, зокрема підвищення концентрації оксиду вуглецю.

Добре відомо, що чоловічий гаметофіт вирізняється високою чутливістю до дії несприятливих чинників довкілля. Метод визначення стерильності пилку є одним із ефективних інструментів оцінювання екологічного стану територій. За умов забруднення середовища кількість крахмаловмісних пилкових зерен зменшується [1, 2], проте це питання в літературі висвітлено недостатньо.

Встановлено, що пилкок *C. vulgaris* у більшості випадків морфологічно сформований, добре забарвлюється барвниками та є фертильним (до 83 %). Відомо також, що якість пилку істотно залежить від особливостей метеорологічних умов і походження рослин [9]. Нами визначено доволі низький спонтанний рівень стерильності пилкових зерен (8,2 %), що продукуються генеративними органами *C. vulgaris* у екологічно сприятливій зоні.

У всіх без винятку моніторингових точках зафіксовано певний рівень індукованої стерильності пилку всіх досліджених рослин.

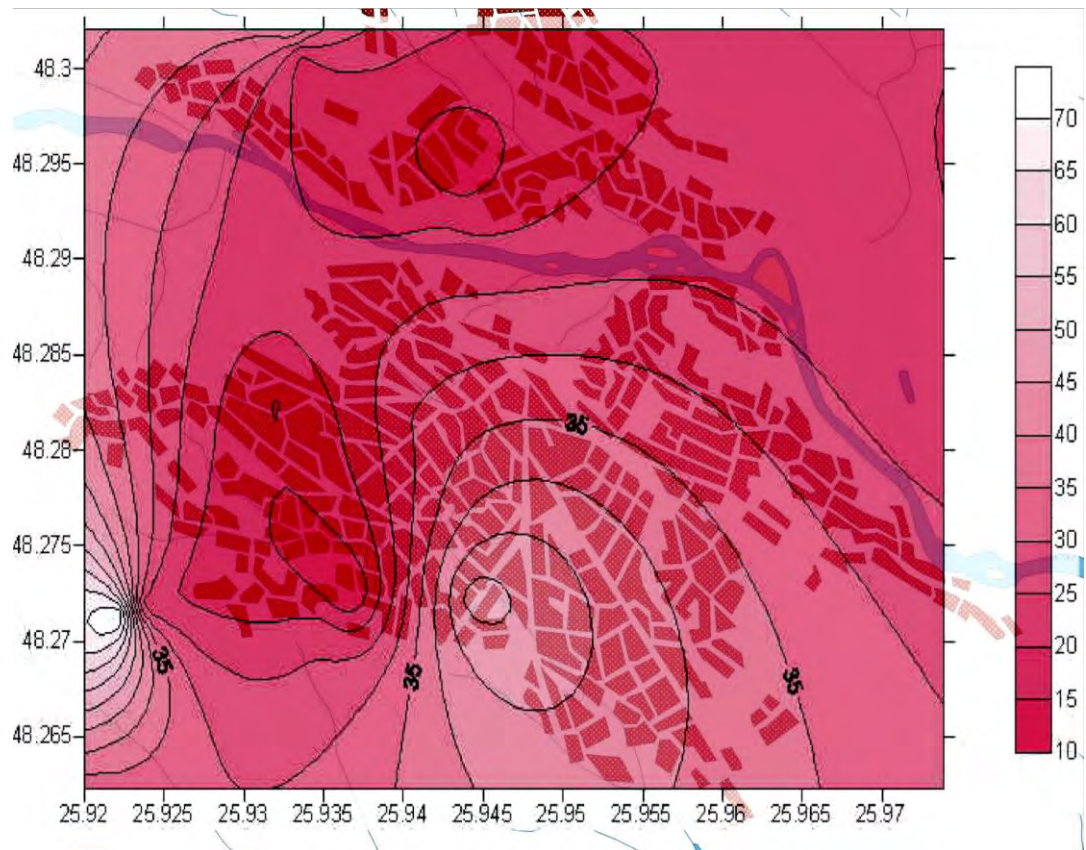


Рис. 1. Концентрація CO₂ в повітрі урбоєкосистеми

Показники стерильності чоловічого гаметофіту різко зростали у рослин, що зростають уздовж вулиць із високою інтенсивністю руху, особливо на ділянках із недостатньою аерацією території. Індукована аеротехногенним забрудненням

стерильність пилових зерен зростала у дерев, що зростають у цих точках, у кілька разів порівняно з контрольним варіантом. Так, частка абортивних пилових зерен збільшувалася у 3,5–4 рази (рис. 2).

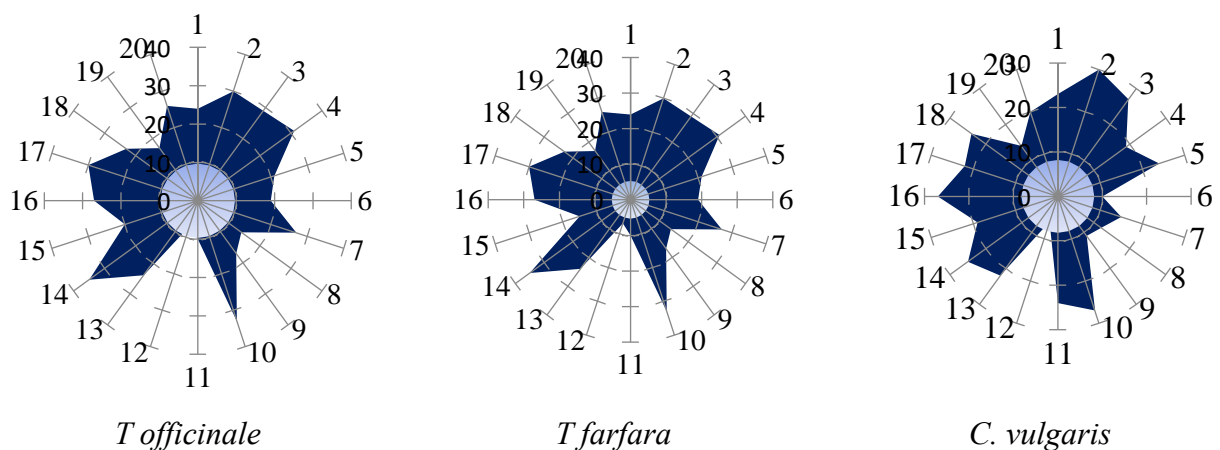


Рис. 2. Стерильність пилових зерен біоіндикаторів

У зоні інтенсивного транспортного руху частка абортивного пилку становила 31 % від загальної кількості пилових зерен. Водночас у деяких моніторингових

точках, попри зростання інтенсивності руху та відповідно збільшення емісії екотоксикантів, кількість стерильного пилку дещо знижувалася — до 27 %.

Імовірно, це може бути пов'язано з наявністю або відсутністю локальної аеродинамічної тіні. У цілому зафіксовано достовірне зростання частки безкрохмальних пиляків у рослин, що зростають на більшості досліджених вулиць. Водночас у низці моніторингових точок рівень їх стерильності залишався на рівні контрольних значень, хоча інтенсивність руху автотранспорту на цих ділянках є достатньо високою. Ймовірно, це пов'язано з вдалим інженерно-архітектурними рішеннями: одно- чи малоповерховою забудовою, наявністю деревних насаджень, відсутністю перехрест'я і, відповідно, кращою аерацією простору.

Встановлено, що в зоні сильного забруднення формувалося більше життєздатної пилку, тоді як за умов середнього забруднення зростала частка особин із нижчою фертильністю чоловічого гаметофіту. Зниження якості пилку за середнього рівня забруднення пов'язане з ембріотоксичною та кластогенною дією аерополітантів на репродуктивну систему рослин [3]. Отримані результати свідчать, що викиди автотранспорту негативно впливають на чоловічу репродуктивну сферу *C. vulgaris*, що проявляється у зростанні частки стерильних пиляків. Аналіз частки безкрохмальної пилку *T. officinale* показав, що цей вид є чутливішим порівняно з *C. vulgaris*. Лише в одній моніторинговій точці відмічено рівень стерильності, близький до спонтанних значень. В інших точках встановлено достовірне підвищення індукованої стерильності пилку *T. officinale*, причому максимальне перевищення становило 3,6 рази. Подібна тенденція до зростання частки безкрохмальних пиляків зафіксована і для *Tussilago farfara* L.

На відміну від даних інших авторів [2], у нашому дослідженні стерильні пиляки не проявляли виразної деформації, натомість фертильні зерна відрізнялися за розмірами. Це стало підставою для визначення морфометричних параметрів пилку біоіндикаторів. Для видів вишні

характерна незначна кількість зерен зі зміненою формою (заглибини, виїмки, видовження тощо). Виявлено мінімальне значення довжини пилку *C. vulgaris* – 2,9 мкм за контрольного показника 3,9 мкм; мінімальна ширина становила 2,8 мкм за контрольних 3,8 мкм, що також достовірно відрізняється від контролю (табл. 1). Ймовірно, під дією аерополітантів у пиляках виникають локальні мутації, що стосуються переважно форми пилкових зерен.

У низці моніторингових точок виявлено істотне зменшення як довжини, так і ширини пилку. Саме в цих пунктах зафіксовано високу інтенсивність автотрафіку та підвищений вміст оксиду карбону в приземному шарі повітря. Отже, отримані результати підтверджують участь оксиду карбону (II) у зміні морфометричних характеристик пилку *C. vulgaris*.

У літературі наведено дані про вплив забруднення довкілля важкими металами (Fe, Mn, Cr, Zn, Cu тощо) на морфологічні властивості пилку – автори повідомляють не лише про зниження фертильності, а й про зменшення розмірів пилкових зерен [3, 7]. Подібні закономірності виявлені й у нашому дослідженні: у точках із найвищим рівнем стерильності пилку вишні встановлено достовірне зменшення його морфометричних параметрів.

Для *T. officinale*, так само як і для наведеного вище виду, виявлено зменшення розмірів пилкових зерен (табл. 1). Водночас необхідно зазначити, що морфометричні параметри пилку змінювалися не настільки суттєво, як рівень його стерильності. На відміну від *C. vulgaris*, морфометричні характеристики пилку *Taraxacum officinale* F. Web. змінювалися однорідно. Порівняння результатів аналізу пилку вишні та кульбаби продемонструвало істотні відмінності між параметрами пилку досліджених видів. Так, у низці моніторингових точок зафіксовано достовірне зменшення довжини та ширини пилкових зерен *Cerasus vulgaris* Mill., тоді

як для *T. officinale* характерне істотне зростання рівня індукованої стерильності пилку при майже незмінних його морфометричних показниках. Довжина пилку кульбаби коливалася у межах 3,5–4,9 мкм за контрольного значення 4,5 мкм, а ширина — 3,6–4,8 мкм за контрольного значення 4,0 мкм.

На відміну від попередніх видів, для *Tussilago farfara* L. встановлено достовірне зменшення морфометричних показників. Крім того, у рослин, що зростають у цих точках, виявлено достовірне збільшення частки пиляків, які не містять крохмалю, на тлі одночасного достовірного зменшення їхніх морфометричних характеристик. В інших точках спостереження зафіксовано достовірне зменшення або довжини, або ширини пилку. Мінімальна довжина пилкових зерен становила 2,9 мкм, що на 26 % менше за контрольне значення; мінімальна ширина – 2,8 мкм за контрольного показника 3,8 мкм.

Узагальнюючи ці результати, можна констатувати, що досліджені біоіндикатори, реагуючи на однакові антропогенні чинники схожим рівнем стерильності пилку, вирізняються різними типами морфометричної відповіді. Окремо слід підкреслити специфічну особливість пилку *Tussilago farfara* L.: встановлено зменшення розмірів фертильних пилкових зерен за практично незмінного відсотка їх стерильності.

Для об'єктивної оцінки залежності між змінами рівня стерильності пилку біоіндикаторів і концентрацією оксиду карбону в атмосферному повітрі проведено парний кореляційний аналіз. Його результати засвідчили пряму кореляційну залежність середнього рівня між концентрацією оксиду карбону (II) та часткою безкрохмальних пилкових зерен усіх досліджених видів ($r = 0,52-0,63$). Також встановлено обернену кореляційну залежність між концентрацією оксиду карбону (II) та довжиною пилкових зерен у всіх без винятку біоіндикаторів. Щодо ширини пилкових зерен виявлена інша

закономірність – зафіксовано слабкий кореляційний зв'язок.

Таким чином, результати дослідження свідчать про участь оксиду карбону разом із кліматичними чинниками у збільшенні кількості стерильних пилкових зерен у зазначених видів рослин. Отримані дані підтверджують придатність пильцевого методу для діагностики забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту. Показано пряму кореляцію між середнім рівнем стерильної пилку та концентрацією оксиду карбону в повітрі, а також обернений зв'язок між концентрацією оксиду карбону (II) та довжиною пилку досліджених видів. Серед аналізованих біоіндикаторів найбільш чутливими до вмісту оксиду карбону (II) в атмосферному повітрі виявилися *Taraxacum officinale* F. Web. ex Wigg. та *Tussilago farfara* L.

Подальший розвиток досліджень передбачає розширення спектра біоіндикаторних видів та формування багаторівневої системи оцінювання чутливості рослин до автотранспортних викидів. Важливим напрямом є створення інтегральної шкали палинотоксичності, що об'єднає морфометричні параметри пилку, рівень стерильності та концентрацію аерополітантів у єдину діагностичну систему.

Перспективною є інтеграція результатів пильцевого аналізу з просторово-часовими даними про транспортні навантаження, мікрокліматичні модифікатори та хімічний склад атмосферного повітря. Це дасть змогу сформувати ГІС-орієнтовані моделі ризикам, відображати сезонну динаміку токсичного навантаження і прогнозувати стан повітря під впливом автотранспорту.

Окрему увагу доцільно приділити застосуванню машинного навчання та комп'ютерного зору для автоматизованого аналізу морфометрії пилку. Запровадження таких технологій забезпечить швидке опрацювання великих масивів даних та підвищення об'єктивності оцінювання палинотоксичності.

Подальші дослідження комбінованого впливу CO, NO_x, O₃ і твердих частинок сприятимуть розвитку мультипараметричного біосурвейлансу та оптимізації системи моніторингу якості повітря в урбанізованих умовах.

Висновки. Встановлено, що пилкові зерна *Cerasus vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* F. Web. та *Tussilago farfara* L. порізно реагують на вплив автотранспортних викидів, формуючи видоспецифічні типи морфометричних змін та рівнів стерильності. Найбільш виражені морфометричні відхилення зафіксовано у *C. vulgaris* та *T. farfara*. Визначено, що для *T. officinale* характерне зростання рівня стерильності без істотної зміни розмірів пилку, тоді як для *T. farfara* виявлено зменшення довжини та ширини навіть фертильних зерен на тлі стабільного відсотка стерильності. Проведений парний кореляційний аналіз підтвердив пряму залежність між концентрацією CO₂ та часткою стерильних пилкових зерен ($r = 0,52-0,63$) та зворотну залежність між рівнем CO₂ і довжиною пилкових зерен усіх індикаторних видів. Показано діагностичну здатність пильцевого методу у виявленні токсичного впливу автотранспортних викидів. Найчутливішими до палинотоксичності виявилися *T. officinale* та *T. farfara*. Обґрунтовано доцільність поєднання даних пильцевого аналізу з геоінформаційними технологіями для створення локальних карт палинотоксичності та просторового виділення екологічно напружених ділянок.

Література

1. MDPI. (2020). *Pollution of the environment and pollen: A review*. MDPI. <https://www.mdpi.com/>
2. Plant Stress. (2025). *Impact of air pollution on reproductive biology of plants: Mechanisms and consequences*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/>
3. Ukrainian Journal of Ecology. (2020). *Using of Taraxacum officinale (L.) pollens for the urban park bioindication*. Mendelej. <https://www.mendeley.com/catalogue/ed17a51b-41a1-34a0-80d1-575b21f9bc49>
4. Комарова, І. О. (2024). *Біоіндикація якості навколишнього середовища з використанням кульбаби лікарської (Taraxacum officinale Wigg.)*. Таврійський науковий вісник. <http://lib.udau.edu.ua>
5. Khomenko, T. K. (2019). *Еколого-біологічні особливості Taraxacum officinale Wigg за дії забруднення важкими металами в умовах промислового Криворіжжя*. Elibrary KDPU. <http://elibrary.kdpu.edu.ua>
6. Majd, A., Rezanejad, F., & collaborators. (2012). *Using the pollen viability and morphology for fluoride pollution biomonitoring*. Journal of Environmental Quality 147(1-3):315-9. [doi:10.1007/s12011-011-9290-8](https://doi.org/10.1007/s12011-011-9290-8)
7. Морозова Т.В., Хрутьба В.О., Кобзиста О.П. Скринінг паліноморфологічного та палинотоксичного ефекту автотранспортних емісій *Науково-технічний збірник Вісник Національного транспортного ун-ту. Серія «Технічні науки»* Випуск 3 (43), 2019. С. 116-126. [doi:10.33744/2308-6645-2019-1-43-116-126](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2019-1-43-116-126).