

## ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АБОРТИВНОСТІ БІОІНДИКАТОРА

**Т. Б. Кудрявська, А. О. Дичко**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: t.kudryavska@kpi.ua

В роботі розглянута актуальність питання залежності рівня стерильності пилку від концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Наведена класифікація сучасних методів прогнозування впливу техногенного забруднення на навколишнє природне середовище. Наведені основні забруднюючі речовини атмосфери урбокосистеми м. Київ та ті поллютанти, які впливають на абортивність рослини-біоіндикатора. Визначені особливості застосування математичних моделей в біоіндикаційних дослідженнях. Представлений алгоритм кореляційно-регресійного аналізу. Побудована модель лінійної множинної регресії, що пов'язує показники стерильності пилку та концентрації декількох забруднюючих речовин одночасно. Перевірено достовірність математичної моделі за допомогою критерія Фішера та оцінено її якість на основі коефіцієнта детермінації. Запропоновані варіанти подальшого використання отриманої моделі.

**Ключові слова:** методи біоіндикації, абортивність пилку, поллютант, математична модель, кореляційно-регресійний аналіз.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АБОРТИВНОСТИ БИОИНДИКАТОРА

**Т. Б. Кудрявская, А. О. Дичко**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
ул. Борщаговская, 115, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: t.kudryavska@kpi.ua

В работе рассмотрена актуальность вопроса зависимости уровня стерильности пыльцы от концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Приведена классификация современных методов прогнозирования влияния техногенного загрязнения на окружающую среду. Приведены основные загрязняющие вещества атмосферы урбокосистемы г. Киев и те поллютанты, которые влияют на абортивность растения-биоиндикатора. Определены особенности применения математических моделей в биоиндикационных исследованиях. Представленный алгоритм корреляционно - регрессионного анализа. Построенная модель линейной множественной регрессии, связывающая показатели стерильности пыльцы и концентрации нескольких загрязняющих веществ одновременно. Проверена достоверность математической модели с помощью критерия Фишера и оценено ее качество с помощью коэффициента детерминации. Предложены варианты дальнейшего использования полученной модели.

**Ключевые слова:** методы биоиндикации, абортивность пыльцы, поллютант, математическая модель, корреляционно-регрессионный анализ.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** На сьогоднішній день все більшої популярності набуває використання методів біоіндикації для оцінки стану довкілля. Як показують роботи О.В. Попової, С.В. Руденко, Т.В. Морозової, застосування лише фізико-хімічних методів не відображають реальної екологічної обстановки, тому що за їх допомогою визначаються фактичні значення концентрацій поллютантів, а методи біоіндикації дозволяють визначити сукупну дію всіх забруднень (хронічну та короткотривалу), є чутливими і достатніми для адекватної оцінки стану навколишнього середовища [1].

Репродуктивні системи рослинних організмів досить часто використовують в якості біоіндикаційних показників, оскільки вони є надійним критерієм для ранньої індикації техногенних впливів [2,3].

В роботах В.П. Бессонової, А.І. Горової, І.Й. Случик, Н.Р. Хомич. вивчалися питання механізму впливу забруднювачів на репродуктивну систему рослин-індикаторів, досліджувався зв'язок між рівнем забруднення та стерильністю пилку, визначався відсоток стерильності пилку на ділянках з різним рівнем техногенного навантаження (урбанізовані,

промислові, селітебні зони) та різним типом забруднювачів (пересувні і стаціонарні) [4,5].

Проте питання від яких забруднюючих речовин залежить стерильність пилку досі залишається не вивченим. В той час як його розгляд допоможе краще зрозуміти характер взаємозв'язку між репродуктивною системою рослин-біоіндикаторів та поллютантами, виділити речовини, що найбільш впливають на стерильність пилку, це дозволить прогнозувати стан довкілля в майбутньому

*Метою роботи є побудова математичної моделі, що кількісно відображає рівень стерильності пилку на основі даних забруднень атмосферного повітря.*

### МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Окрім оцінки існуючого рівня забруднення навколишнього середовища, важливим питанням залишається прогноз стану довкілля в майбутньому. Аналіз проведених спостережень та встановлення закономірностей у зміні стану екосистеми дозволяють визначити характер цих змін та фактори, що їх викликають.

Прогноз і оцінка прогнозованих змін у навколишньому середовищі дають змогу не лише визначити

## Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

та провести природоохоронні заходи, направлені на зменшення вже існуючого негативного впливу на геосистему, але й розробити профілактичні міри, які б дозволили попередити негативні ефекти, що ще не виявилися.

Усі прогнози мають ймовірнісний характер і ґрунтуються на даних про стан навколишнього природного середовища на певний момент часу і в минулому.

М.О. Клименко, А.М. Прищеп, Н.М. Вознюк [6] у системі моніторингу виділяють наступні методи прогнозування:

- експертне оцінювання. Сутність його полягає в отриманні і спеціалізованому обробленні прогнозних оцінок об'єкта через опитування висококваліфікованих фахівців (експертів) у певній сфері науки, техніки, виробництва. Оцінки експертів суттєво підвищують надійність прогнозів, отриманих за допомогою інших методів прогнозування;

- екстраполяція (поширення висновків, отриманих унаслідок спостереження за однією частиною явища, на іншу частину) та інтерполяція (встановлення проміжних значень об'єкта на підставі деяких відомих його значень). Ці методи ефективні при короткостроковому прогнозуванні стосовно об'єкта, який тривалий час розвивався рівномірно без значних відхилень. Ґрунтуються вони на вивченні кількісних і якісних параметрів досліджуваного об'єкта за попередні роки з подальшим логічним продовженням, окресленням тенденцій його розвитку у прогнозованому періоді;

- моделювання. Метод полягає у побудові моделей, які розглядають з урахуванням імовірної або бажаної зміни прогнозованого явища на певний період, користуючись прямими або опосередкованими даними про масштаби та напрями змін. Методи моделювання використовують для складання глобальних, локальних та інших прогнозів.

На сьогоднішній день основне місце серед методів прогнозування займають методи моделювання. Умовно їх поділяють на дві великі групи: матеріальне й ідеальне моделювання [7].

Для матеріального моделювання використовуються такі способи моделювання, при яких дослідження ведеться по моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, хімічні, біологічні, динамічні, функціональні характеристики об'єкта, що досліджується. До матеріального моделювання відносяться такі його різновиди як фізичне й аналогове моделювання. По своїй суті матеріальне моделювання є експериментальним.

Ідеальне моделювання засноване не на матеріальній аналогії об'єкта й моделі, а аналогії ідеальної. Ідеальне моделювання носить теоретичний характер. Найважливішим його різновидом є математичне моделювання, при якому дослідження об'єкта здійснюється за допомогою моделі, сформульованої з використанням тих або інших математичних методів. Будь-яка математична модель, що описує складні процеси, неминуче базується на багатьох спрощеннях. Природно, для різних ієрархічних рівнів прийняття рішень необхідні математичні моделі з

різним ступенем деталізації [8].

Для побудови математичних прогнозних моделей необхідно:

- виявити значимі фактори;
- з'ясувати їх співвідношення з прогнозованим явищем;
- розробити програму моделювання змін довкілля під факторів.

Для прогнозування екологічних наслідків антропогенного забруднення довкілля найчастіше використовують такі моделі:

- модель перенесення і перетворення забруднюючих речовин у навколишньому середовищі (геофізична модель), яка забезпечує прогнозування зміни стану довкілля з урахуванням процесів міграції, фізичної, хімічної, біологічної трансформації забруднюючих речовин;

- модель зміни стану екосистеми під впливом забруднення (екологічна модель), що сприяє отриманню інформації про стійкість, особливості розвитку екологічної системи, аналізу поведінки екологічних систем і передбаченню їхніх реакцій при внесенні в систему певних змін.

Вихідною інформацією для побудови математичної моделі були експериментальні дані отримані при застосуванні методу біоіндикації та значення концентрацій забруднюючих речовин, які були надані Центральною геофізичною обсерваторією м.Київ.

Територією дослідження було обрано місто Київ. Дана урбоєкосистема характеризується складним рельєфом, в умовах якого формуються повітряні маси з високою концентрацією забруднюючих речовин.

Переважаючими політантами тестової урбоєкосистеми є оксид карбону (II), сполуки нітрогену, леткі органічні сполуки, амоніак, пил. На їх долю припадає понад 90% від загальної кількості викидів в атмосферне повітря міста, тому в подальшому дослідженні використовували значення концентрацій саме цих речовини.

Дослідження рівня абортивності біоіндикатора проводилися за тестом "Стерильність пилку рослин фітоіндикаторів". В якості індикатора було обрано Кульбабу лікарську (*Taraxacum officinalis* Webb.), оскільки вона є поширеною у містах, невибагливою придорожною рослиною і відповідає всім вимогам, поставленим до рослини-індикатора [9,10].

На основі експериментальних даних була встановлена залежність показника стерильності пилку рослини-біоіндикатора від величини концентрації забруднюючої речовини у повітрі, яка носить параболічний характер і описується поліномом третього порядку та дозволяє визначити забруднюючі домішки, що впливають на зміну репродуктивних характеристик [11].

Для перевірки адекватності отриманих результатів було визначено, що значення розподіляються нормально (обов'язкова вимога регресійного аналізу) [12] та виконано статистичну обробку експериментальних даних. В тому числі був розрахований показник точності дослідження, який визначає ступінь

**Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля**

надійності одержаних даних, репрезентативність використаної вибірки. Точність вважається достатньою, якщо Р менший від 3%, і задовільною при Р від 3% до 5%. В даному випадку показник точності дорівнює 3,3%, що доводить можливість використання отриманих результатів для побудови математичної моделі [13].

Математичні моделі описують властивості біологічних об'єктів шляхом апроксимації особливостей будови, взаємозв'язків, процесів формулами математичних залежностей. Математична модель в біометрії має важливе значення подвійного характеру. По-перше, біометрична модель є об'єктивною характеристикою об'єкта, що представляє відповідний результат досліджень. По-друге, вона сама може бути об'єктом подальших досліджень, являючи собою достовірну імітацію відповідних особливостей біологічного об'єкту досліджень.

Залежність оцінок параметрів біометричної моделі і коефіцієнтів парної кореляції покладено в основу алгоритму покрокової регресії (кореляційно регресійного аналізу) [14].

На першому етапі кореляційно регресійного аналізу (КРА) за даними первісних спостережень обчислювалися коефіцієнти кореляції для виявлення кількісної тісноти взаємозв'язку між двома ознаками (табл. 1).

Коефіцієнт кореляції є безрозмірною величиною, що змінюється в межах від -1 до +1. Рівність  $r = 0$  означає відсутність лінійної залежності, але не виключає нелінійної. Чим ближче  $|r|$  до одиниці, тим "тісніший" лінійний зв'язок між двома випадковими величинами. Знак  $r$  визначає напрямок зв'язку (плюс — прямий, мінус — зворотний). Якщо  
 $|r| < 0,30$  — зв'язок між ознаками слабкий;  
 $0,30 \leq |r| \leq 0,70$  — помірний зв'язок;  
 $|r| > 0,70$  — сильний або щільний зв'язок.  
 $|r| = 1$  — зв'язок функціональний.

Таблиця 1 – Коефіцієнти кореляції Пірсона та t-критерій Ст'юдента для визначення зв'язку рівня стерильності пилку та концентрації поллютанта

Поллютант	r	t <sub>факт.</sub>
Пил	0,34	-
Оксид сірки (IV)	0,32	-
Оксид карбону (II)	0,81	5,222
Оксид нітрогену (IV)	0,88	6,985
Фенол	0,74	4,075
Формальдегід	0,77	4,485
Амоніак	0,73	3,959
Хлористий водень	0,34	-
Фтористий водень	0,59	-

Аналіз коефіцієнтів кореляції показує, що рівень стерильності пилку має щільний зв'язок з такими токсикантами як оксид карбону (II), оксид нітрогену (IV), фенол, формальдегід та амоніак, тому що  $|r| > 0,7$ . Оскільки пил, оксид сірки (IV), хлористий та фтористий водень мають незначний зв'язок з залежною змінною, то для побудови математичної моделі вони не використовувались.

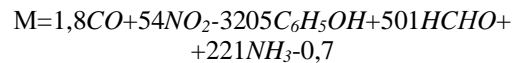
На другому етапі КРА обчислювалася статистична значущість коефіцієнтів кореляції. Оцінку статистичної значущості виконували з використанням t-критерію Ст'юдента. Фактичне значення цього критерію визначали за формулою 1:

$$t_{\text{факт.}} = \frac{r \cdot (n-2)}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (1)$$

де  $r$  — парний коефіцієнт кореляції,  
 $n$  — число спостережень.

Відповідні значення цього критерію представлені в таблиці 1, а критичне значення t-статистики при рівні значущості  $P=0,05$  дорівнює  $t_{\text{табл.}} \approx 1,753$ . Таким чином для всіх коефіцієнтів значимих факторів  $t_{\text{факт.}} > t_{\text{табл.}}$ , отже всі коефіцієнти кореляції статистично значущі.

На наступному етапі КРА побудована модель лінійної множинної регресії, що пов'язує показники стерильності пилку та концентрації декількох забруднюючих речовин одночасно:



Завершальним етапом КРА є перевірка адекватності побудованої біометричної моделі [15]. Зазвичай висновок про правильність вибору виду взаємозв'язку та характеристику значимості всього рівняння регресії отримують за допомогою критерія Фішера, що розраховується за формулою 2:

$$F_{\text{розр.}} = \frac{r^2 \cdot (n-m)}{(1-r^2)(m-1)}, \quad (2)$$

де  $m$  — число параметрів рівняння регресії.

Табличне значення F-критерію при рівні значущості  $P=0,05$   $F_{\text{табл.}} \approx 3,33$ ,  $F_{\text{розр.}} = 11,26$ , що значно перевищує  $F_{\text{табл.}}$ , тобто математичну модель складено правильно.

Для оцінки якості моделі використовували коефіцієнт детермінації, що дорівнює  $R^2 = 0,85$ , тобто модель регресії добре апроксимує вихідні дані.

Необхідно відмітити, що отримана математична модель має не предметний, а прогностичний характер, тобто її не можна використовувати при оцінці зміни стерильності пилку рослин-біоіндикаторів при незалежній зміні концентрацій значимих поллютантів, оскільки в такому випадку рівень абортивності біоіндикатора зменшиться при збільшенні концентрації фенолу.

Дана регресійна модель описує зміни рівня стерильності пилку при такій сумарній дії концентрацій поллютантів, яка має місце в досліджуваній урбо-екосистемі. Таким чином нею можна скористатися для прогнозу значень результативного показника, наприклад, при побудові нової автомагістралі або іншого джерела забруднення, основними забруднюючими речовинами є ті, що наведені в регресійній моделі.

## Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

## ВИСНОВКИ:

1. Серед основних забруднюючих речовин Києва визначено, що оксид карбону (II), оксид нітрогену (IV), фенол, формальдегід, амоніак впливають на рівень стерильності пилку, оскільки коефіцієнти кореляції вказують на тісний зв'язок між даними ознаками.

2. Методом покрокової регресії побудована математична модель взаємозв'язку рівня абортивності пилку та забрудненням атмосферного повітря, яка характеризується високим коефіцієнтом детермінації (0,85), що дозволяє використовувати дану модель для прогнозу значень показника стерильності пилку, а відповідно і оцінки стану урбоекосистеми.

Отриманні дані під час проведення експерименту в подальшому планується використовувати для розробки методу оцінки та прогнозування впливу техногенного забруднення на урбанізовані екосистеми за показниками екологічно допустимих концентрацій.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Глухов О. З. Індикація стану техногенного середовища за морфологічною мінливістю рослин / О. З. Глухов, С. Л. Прохорова // Промышленная ботаника, 2008. – Вып. 8. – С. 3–11.
2. Müller M. Die Anwendung der «Cytogenetischen Bioindikation» zur Früherkennung von Vegetationsschädens in der Steiermark / M. Müller, H. Guttenberg, D. Grill // Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark. – 1991. – В. 121. – S. 43–50.
3. Бондарь Л. М., Частоколенко Л. В. Цитогенетический анализ действия антропогенных факторов на природные популяции растений / Л. М. Бондарь, Л. В. Частоколенко // Генет. последствия загрязнения окружающей среды мутаген. факторами: Всес. координац. совещ. М.: 1990. – С. 52–53.
4. Бессонова В. П., Лыженко И. И Влияние загрязненной среды на прорастание и физиологическое состояние пыльцы некоторых древесных растений // Ботанический Журнал. – Санкт-Петербург: Наука, 1991. – т.76, № 3. – С. 422–426.
5. І. Й. Слущик Біоіндикація стану довкілля на

урбанізованій території за допомогою представників роду *Populus L.*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. біол. наук: спец. 03.00.16 – ЧДУ ім. Федьковича, Чернівці, 2000. – 18 с.

6. Клименко М. О. Моніторинг довкілля / М. О.Клименко, А. М.Прищеп, Н. М.Вознюк. – К.: Академія, 2006. – 360 с.

7. Кучеров К.І. Сучасні наукові методи дослідження, оцінки та прогнозування впливу техногенного забруднення на безпечне функціонування навколишнього природного середовища // Людина та довкілля. Проблеми неоекології: журнал наукових праць / Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. – Х. : Видавництво ХНУ ім. В.Н. Каразіна. – 2008. – № 1 - 2. – С. 104–112.

8. Еременко Е.В. Экологические модели разной сложности для прогнозирования качества воды / Е.В. Еременко // Сб. науч. тр. УкрНИИЭП. – Харьков, 2000, С. 90–99.

9. Бертиз С., Эндерляйн Х. Влияние загрязненный воздуха на растительность / С. Бертиз, Х. Эндерляйн – М.: «Наука», 1989. – 258 с.

10. Grant W. F. The present status of higher plant for the detection of environmental mutagens // Mutation Research. – 1994. – Vol. 310. – №2. – pp. 175–185.

11. Кудрявська Т. Б. Обґрунтування використання показника абортивності біоіндикатора для оцінки техногенного навантаження / Т. Б. Кудрявська // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2014. – Вип. 23. – С. 89–95.

12. Г. Ф.Лакин Биометрия: Учеб. пособие [для биол. спец. Вузов]/ Г.Ф.Лакин – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с

13. Калінін М. І. Біометрія: Підручник [для студентів вузів біологічних і екологічних напрямків]/ М.І. Калінін, В.В. Єлісеєв. – Миколаїв: Вид-во МФ НаУКМА, 2000. – 204 с.

14. Дрейпер Н., Прикладной регрессионный анализ / Дрейпер Н., Смит Г. – М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.

15. Плохинский Н. А. Биометрия / Плохинский Н. А. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 367 с.

## PREDICTION OF ENVIRONMENTAL USING MATHEMATICAL MODELING ABORTIVE BIOINDICATORS

**T. Kudryavskaya, A. Dychko**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

vul. Borschagivska, 115, Kiev, 03056, Ukraine, E-mail: t.kudryavska@kpi.ua

The paper discusses the relevance of the question depending on the level of pollen sterility of concentrations of pollutants in ambient air. A classification of current methods for predicting the influence of anthropogenic pollution on the environment are presented. The main pollutants of the atmosphere urboecosystem Kiev and those pollutants that affect abortive plant – indicator are presented. The features of use of mathematical models in bioindication research are established. The algorithm of the correlation and regression analysis is developed. Model of linear multiple regression linking indicators of sterility and pollen concentrations of several pollutants simultaneously is constructed. Accuracy of the mathematical model using Fisher's exact test was verified and its quality by using the coefficient of determination is evaluated. Options for further use of the resulting model are proposed.

**Key words:** methods bioindication, abortive pollen, pollutants, mathematical model, correlation and regression analysis.

## REFERENCES

1. Gluhov, O and Prohorova, S (2008), «Status indication industrial environment for morphological variability of plant», *Promyishlennyya botanika*, vol. 8, pp. 3-11.
2. Müller, M (1991), «Die Anwendung der Cytogenetischen Bioindikation zur Früherkennung von Vegetationsschädens in der Steiermark», *Mitt. Naturwiss.* vol. 121, pp. 43-50.
3. Bondar', L and Chastokolenko, L (1990), «Cytogenetic analysis of the effects of anthropogenic factors on natural populations of plants», *Geneticheskie posledstviya zagryazneniya okruzhayushey sredy mutagennymi faktorami*, Vsesoyuznoe koordinatsionnoe soveshanie [Genetic effects of pollution mutagenic factors, All-Union Coordination Meeting], Samarkand, October 8-10, 1990, pp. 52-53.
4. Bessonova, V., Lugenko I. (1991) «Effect of polluted environment on germination and physiological state of some of the villages of pollen plants», *Botanicheskiy gurnal*, vol. 76, no 3, pp. 422-426.
5. Sluchik I.J. (2000), « Bioindikation state of the environment urboarea with the genus *Populus* L», thesis abstract for Cand. Sc (ecology), 03.00.16, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University Ukrainian Chernivtsi, Ukraine.
6. Klymenko, M. O., Pryshchepa, A. M. and Voznyuk, N. M. (2006), *Monitorynh dovkilliya* [Environmental monitoring], Akademiya, Kyiv, Ukraine.
7. Kucherov, K. I. (2008), «Modern scientific methods of research, evaluation and prediction of the impact of anthropogenic pollution on the safe operation of the natural environment», *Lyudyna ta dovkilliya. Problemy neokolohiyi*, no. 1-2, pp. 104 –112.
8. Eremenko, E.V. (2000), «Ecological models of varying complexity to predict water quality», *UkrNYYP*, pp.90-99.
9. Bertiz, S and Enderlein, X (1989), *Vliyanie zagryazneniya vozduha na rastitel'nost'* [The influence of air pollution on plants], Nauka, Moscow, Russia.
10. Grant W.F. (1994) «The present status of higher plant for the detection of environmental mutagens», *Mutation Research*, vol. 310, no 2, pp. 175 –185.
11. Kudryavska, T. B. (2014), «Substantiation of use of the index of an abortive of bioindicators for the evaluation of technogenic pressure», *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Hirnystvo*, no.23, pp.89-95.
12. Lakin, G.F (1990), *Biometriya* [Biometrics], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
13. Kalinin, M.I. and Yelisyeyev, V.V. (2000), *Biometriya* [Biometrics], MF NaUKMA, Nikolaev, Ukraine.
14. Dreyper, N. and Smit, G.(1986), *Pikladnoy regressionnyy analiz* [Applied Regression Analysis], Finansy i statistika, Moscow, Russia.
15. Plohinskiy N.A. (1970), *Biometriya* [Biometrics], Izdatelstvo MGU, Moscow, Russia.