

**СТОХАСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РИЗИКІВ
КРИТИЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ
ПРОМИСЛОВИМИ ЦЕНТРАМИ**

Рябінін А.С.

e-mail: olha.kuryzheva@nure.ua

Науковий керівник – к.ф.-м.н., Жила О.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

м. Харків, Україна

The paper investigates the risks of atmospheric pollution in Zaporizhzhia using statistical modelling methods. It substantiates the transitioning relevance from deterministic to probabilistic air quality assessment methods in conditions of anthropogenic high variability load and military risks. Using the Maple symbolic computation package, simulation modelling was performed based on the exponential distribution of time between events at a certain intensity. The results obtained can be used to develop early warning and decision-making systems in the field of environmental safety.

Атмосферне повітря є найбільш динамічним компонентом довкілля, стан якого безпосередньо впливає на здоров'я населення та стабільність екосистем. Для великих промислових центрів характерне поєднання потужних антропогенних навантажень із високою мінливістю метеорологічних факторів [1]. Традиційні детерміновані методи оцінки не завжди здатні врахувати випадкову природу розсіювання домішок, що робить стохастичний аналіз незамінним інструментом. Цей підхід дозволяє не просто констатувати факт перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК), а у прогнозувати настання критичних станів забруднення, що є основою для прийняття управлінських рішень.

Актуальність обраного дослідження для одного з найпотужніших промислових центрів України – міста Запоріжжя – обумовлена, в першу чергу, специфікою промислового вузла із великою концентрацією підприємств чорної та кольорової металургії, енергетики та хімічної промисловості. Додаткове навантаження на екосистему цього регіону через воєнні дії вимагає гнучких математичних моделей для швидкого оцінювання загроз [2]. Окрім того, у межах євроінтеграції Україна зобов'язана впроваджувати сучасні системи моніторингу та оцінки якості повітря, які базуються на статистичній достовірності та аналізі ризиків для здоров'я.

Метою дослідження є розробка методики стохастичного аналізу ризиків виникнення критичних рівнів забруднення атмосферного повітря у м. Запоріжжя для підвищення ефективності екологічного менеджменту та раннього попередження екологічних загроз. За даними моніторингу 2023 року [3], середній показник AQI у місті становить близько 80 (помірний

рівень), проте концентрація дрібнодисперсного пилу PM2.5 сягає позначок 25 мкг/м^3 , що аж у 5 разів перевищує річну норму ВООЗ [4].

Об'єктом дослідження є випадкові пікові викиди підприємств міста, що мають імпульсний характер. Основною задачею є визначити ймовірність виникнення критичного забруднення протягом 24 годин, якщо інтенсивність випадкових викидів становить $\lambda = 0,03$ події / год та провести детальний аналіз імітаційного моделювання у пакеті символьних обчислень Maple. Критичним станом вважається ситуація, коли протягом розрахункового часу відбувається серія викидів, що сумарно перевищують поріг поглинання атмосфери.

Для моделювання часу між випадковими викидами використано експоненціальне розподілення. Ймовірність настання хоча б одного перевищення за час t

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де $\lambda = 0,03$ – інтенсивність подій на годину часу, $t = 24$ год – час.

Розподіл часу між подіями визначається формулою

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Було проведено 10000 симуляцій добового циклу викидів. Гістограма показує розподіл кількості викидів за 24 години. Видно, що найбільш ймовірна кількість пікових викидів за добу для Запоріжжя – від 0 до 2 (рис.1а). Цікавим фактом є те, що «довгий хвіст» графіка вказує на те, що існує маленький, але реальний ризик ($P \approx 5\%$) отримати більше 4 викидів за добу, що призведе до смогу.

Графік на рис.2а показує, як зростає ймовірність зафіксувати перевищення норми з кожною годиною перебування у промисловій зоні. Для проміжку часу у 24 години ймовірність хоча б одного критичного перевищення становить

$$P(24) = 1 - e^{-0,03 \cdot 24} = 1 - e^{-0,72} \approx 0,5133 \text{ (51,3\%)}. \quad (3)$$

Таким чином, у кожную другу добу в м. Запоріжжя статистично ймовірний викид, що перевищує норми AQI.

Таблиця 1 наочно демонструє місто Запоріжжя у глобальному та національному контексті якості повітря, використовуючи ключові індикатори забруднення та загальний індекс AQI.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз якості повітря

Регіон / Місто	AQI (середній)	PM (мкг / м ³)	Рівень за ВООЗ
Запоріжжя	80	25	Перевищення у 5 разів
Київ	45-55	12-15	Перевищення у 2-3 рази
Осло	15	4	У межах норми
Пекін	120+	60+	Критичний рівень

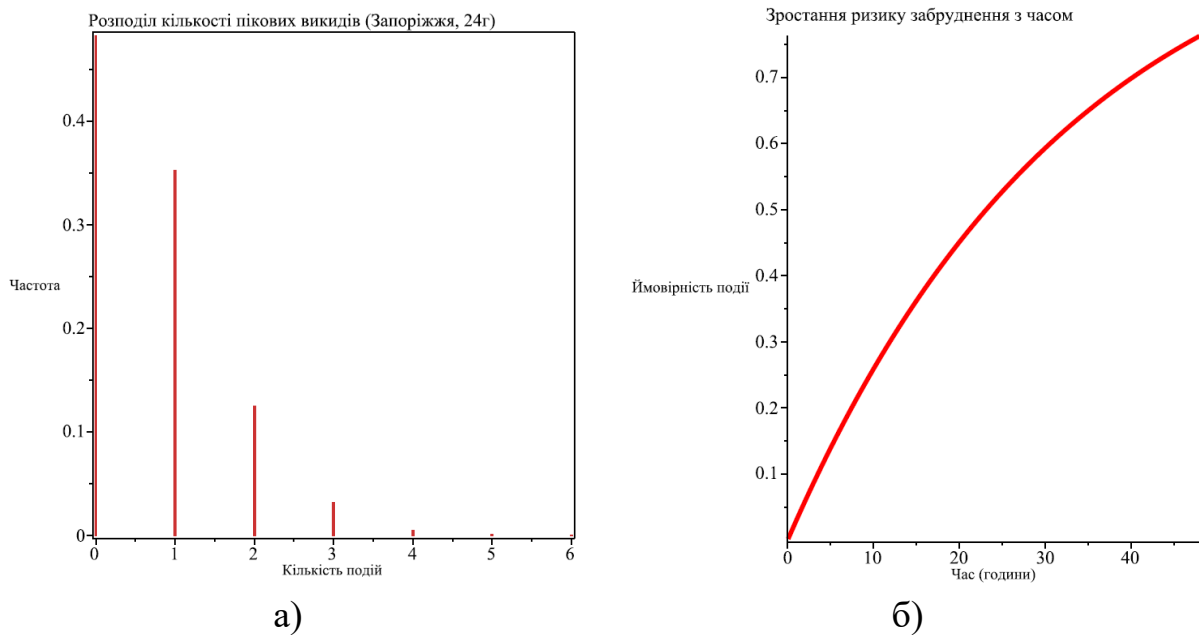


Рисунок 1. Гістограма ймовірностей(а) та функція накопиченого потягом доби ризику (б)

Таким чином, підтверджено критичний екологічний стан атмосферного повітря у м. Запоріжжя. Порівняльний аналіз показав, що рівень PM_{2.5} значно перевищує показники Києва та Осло, наближаючись за ризиками до великих індустріальних хабів світу. Визначено, що використання ймовірнісних моделей дозволяє ефективніше враховувати імпульсний характер викидів підприємств та випадковість метеорологічних факторів порівняно з традиційними методами. Імітаційне моделювання у Maple показало, що найбільш ймовірна кількість пікових викидів за добу становить до 2-х подій. Математично доведено, що ймовірність виникнення критичного забруднення протягом доби перевищує 50 %. Це означає, що статистично кожен другу добу в місті існують умови для формування критичного рівня забруднення. Розроблена методика може стати базою для створення динамічних мап ризику та оптимізації роботи екологічних служб міста.

Список використаних джерел:

1. Михайліченко Д. Р., Експоненціальна модель природного очищення атмосфери від забруднення пиловими частинами PM_{2.5}. // Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті", Харків, 2025, с. 129-131.
2. Закон України «Про охорону атмосферного повітря». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
3. World Air Quality Report 2023. IQAir: Region & City PM_{2.5} Ranking. <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>.
4. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ / WHO). <https://www.who.int>