

МІХАЛЕВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8197-8005>e-mail: cezar_mv@ukr.net

ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННИЙ ПІДХІД ДО МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

У статті розглядається застосування теоретико-множинних методів для моніторингу якості повітря. Запропоновано підхід, що базується на використанні чітких та нечітких множин для аналізу даних з різних сенсорів, що дозволяє підвищити точність оцінки забруднення. Проаналізовано переваги множинного підходу та можливості його впровадження в автоматизовані системи моніторингу. Наведено результати моделювання, які демонструють ефективність розглянутого підходу в умовах реальних екологічних загроз, що викликані забрудненням повітря.

Ключові слова: теоретико-множинний підхід, якість повітря, моніторинг, нечіткі множини, прогнозування.

MIKHALEVSKIY VITALII

Khmelnytsky National University

SET-THEORETICAL APPROACH TO AIR QUALITY MONITORING

The article considers the application of set-theoretical methods for air quality monitoring. An approach based on the use of clear and fuzzy sets for data analysis from various sensors is proposed, which allows to increase the accuracy of pollution assessment. The advantages of the set-theoretical approach and the possibilities of its implementation in automated monitoring systems are analyzed. The modeling results are presented, which demonstrate the effectiveness of the considered approach in conditions of real environmental threats caused by air pollution. The problem of air pollution is one of the most important environmental threats of our time. Air quality monitoring is a key factor in preventing negative consequences for human health and the environment. The use of mathematical methods of data analysis allows to significantly improve the accuracy of measurements and forecasting changes in air quality. One of the promising areas is the application of the set-theoretical approach, in particular fuzzy sets. This approach allows processing data from various sources, taking into account the inaccuracy and uncertainty of measurements. The study of this topic is relevant given the need to monitor and predict air quality, which is a vital feature for both human society and ecosystems. The use of clear fuzzy sets to model the process of monitoring air composition will allow creating effective forecasting and management systems that can be applied both in scientific research and in practical environmental monitoring.

Air pollution has a great impact on the global and local levels; it is becoming a threat to all living things, especially humans. Many developed countries have tried to use modern emerging technologies to determine strategies and methods to improve air quality and, in the long term, mitigate the problem of air pollution. There is a great need to pay attention to air pollution problems, where urbanization and industrialization continue to grow with increasing population density

Keywords: set-theoretic approach, air quality, monitoring, fuzzy sets, forecasting.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.04.2025

Вступ

Актуальність теми. Проблема забруднення повітря є однією з найважливіших екологічних загроз сучасності. Моніторинг якості повітря є ключовим фактором для запобігання негативним наслідкам для здоров'я людини та довкілля. Використання математичних методів аналізу даних дозволяє значно покращити точність вимірювань та прогнозування змін у якості повітря. Одним із перспективних напрямів є застосування теоретико-множинного підходу, зокрема нечітких множин. Такий підхід дозволяє обробляти дані з різних джерел, враховуючи неточність та невизначеність вимірювань. Дослідження цієї теми є актуальним з огляду на необхідність моніторингу та прогнозування якості повітря, що є життєво важливою ознакою як для людського суспільства, так і для екосистем. Використання чітких нечітких множин для моделювання процесу моніторингу складу повітря дозволить створити ефективні системи прогнозування та управління, які можуть бути застосовані як у наукових дослідженнях, так і в практичному екологічному моніторингу.

Постановка проблеми. Ставиться завдання вивчити спосіб використання нечітких множин для моніторингу якості повітря, що дозволяє адаптувати заходи охорони природи, прогнозувати забрудненість повітря, мінімізувати негативний вплив якості повітря на екологічні системи та людське суспільство навіть в умовах військових дій. Необхідно провести функціональне та прикладне дослідження запропонованого способу моніторингу якості повітря, розробити рекомендації для його застосування.

Аналіз останніх джерел. Наукові дослідження, присвячені проблемі забрудненості повітря, акцентують увагу на необхідності врахування екологічних змін та впливу антропогенних факторів. У ряді робіт, зокрема дослідженнях українських науковців, таких як Величко О. М., Зеркалов Д. В. [1], Запорожець А. О. [2] проводяться дослідження, що стосуються моніторингу якості повітря. Аналіз систем моніторингу забруднення повітря в Україні висвітлює основні особливості функціонування

таких системи та пропонує шляхи їх вдосконалення. Зарубіжні вчені, такі як Calorine Katushabe, Santhi Kumaran, Emmanuel Masabo, Muhammad Saleem, Nitinkumar Shingari, Muhammad Sajid Farooq, Beenu Mago [3-4] досліджують проблеми забрудненості повітря у світі, зокрема в Африці. При цьому вивчають методи моніторингу якості повітря та розробку систем на основі теоретико-множинного підходу. У сучасній науковій літературі спостерігається зростаючий інтерес до теоретико-множинних підходів, зокрема нечітких множин для моніторингу якості повітря. Ці методи дозволяють ефективно обробляти невизначеність та неповноту даних, що є характерними для екологічних досліджень.

Метою роботи є вивчення способу використання чітких і нечітких множин для моніторингу якості повітря та розробка теоретичних і практичних напрацювань для прогнозування забрудненості повітря.

Виклад основного матеріалу

Брудне повітря має великий вплив на глобальному та локальному рівнях; стає загрозою для всього живого, особливо для людини. Багато розвинених країн намагалися використати сучасні технології, що розвиваються, щоб визначити стратегії та методи покращення якості повітря та, у довгостроковій перспективі, пом'якшити проблему забруднення повітря. Існує велика потреба звернути увагу на проблеми забруднення повітря, де урбанізація та індустріалізація продовжують зростати зі збільшенням щільності населення. Крім того, відкриваються промислові підприємства, а також велика кількість вживаних транспортних засобів і мотоциклів, які є основними джерелами транспорту, щороку надходить у міста великими темпами. Джерелами забруднення повітря стають зони воєнних дій, пил з ґрунтових доріг, відкрите спалювання як спосіб поводження з незібраними відходами тощо. Величезна кількість брудного повітря надходить із заводів, фабрик, електростанцій.

Розглянемо основні складові забрудненого повітря. Ці показники базуються на рекомендаціях Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) та екологічних агентств.

Таблиця 1

Основні характеристики забрудненості повітря

Позначення	Назва речовини	Гранично допустима концентрація (ГДК), мкг/м ³	Питома вага в загальному забрудненні, %
PM _{2.5}	Тверді частки (дрібнодисперсні)	25 (добова), 10 (річна)	35-40
PM ₁₀	Тверді частки (грубодисперсні)	50 (добова), 20 (річна)	20-25
CO	Чадний газ	10 000 (8-годинна середня)	10-15
NO ₂	Діоксид азоту	40 (річна), 200 (годинна)	10-15
SO ₂	Діоксид сірки	20 (добова), 500 (годинна)	5-10
O ₃	Озон	100 (8-годинна середня)	5-10
Pb	Свинець	0.5 (річна)	<1

Теоретико-множинний підхід у моніторингу якості повітря базується на використанні класичних та нечітких множин для обробки екологічних даних. Основні теоретичні аспекти включають:

1. Класичні множини – застосовуються для чіткого поділу даних за рівнями забруднення. Прикладами можуть виступати класична множина рівнів забруднення $A = \{\text{чисте, помірне, забруднене, дуже забруднене}\}$ та числова множина концентрацій забруднювачів (мкг/м³) $V = \{10, 20, 35, 50, 80\}$.

2. Нечіткі множини – дозволяють враховувати градієнти забруднення та адаптувати систему до неповних або неточних даних. Наприклад, нечітка множина (ступінь належності до рівнів забруднення) $C = \{(10, 1.0), (20, 0.8), (35, 0.6), (50, 0.3), (80, 0.1)\}$. Тут значення представляють рівень забруднення (мкг/м³), а числа в дужках – ступінь належності до категорії «чисте повітря» (від 0 до 1).

Ці множини допомагають класифікувати рівень забруднення та визначати якість повітря за допомогою математичних методів.

Математична модель моніторингу якості повітря може бути подана у вигляді множини параметрів:

1. Кількісні характеристики.

$P = \{PM_{2.5}, PM_{10}, CO, NO_2, SO_2, O_3\}$ – концентрації основних забруднювачів у мкг/м³.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – часові вимірювання (дискретні або неперервні).

2. Якісні характеристики.

$Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$ – де Q_i – суб'єктивні оцінки рівня забруднення («чисте», «помірно забруднене», «забруднене», «дуже забруднене»).

3. Функція належності для нечіткої оцінки рівня забруднення:

$$\mu(Q_i) = \begin{cases} 1, & P_j \leq P_{\text{норма}} \\ e^{-(P_j - P_{\text{норма}})^2 / \sigma^2}, & P_j > P_{\text{норма}} \end{cases} \quad (1)$$

де $P_{\text{норма}}$ – гранично допустима концентрація, σ – коефіцієнт розмитості.

4. Часові періоди:

$F: T \rightarrow P$ – функція, що описує зміну концентрації забрудників у часі.

5. Модель прогнозування:

$$P(t + 1) = f(P(t), X(t)) \tag{2}$$

де $X(t)$ – впливові фактори (метеоумови, антропогенний вплив тощо).

Сучасні системи моніторингу якості повітря часто базуються на мережах сенсорів, які фіксують рівень основних забруднювачів (CO, NO₂, PM_{2.5} тощо). Застосування теоретико-множинних підходів дає змогу використовувати алгоритми машинного навчання для адаптації до змінних умов, інтегрувати різні джерела даних для покращення точності прогнозів, використовувати нечіткі логічні системи для прийняття рішень.

До основних переваг застосування теоретико-множинних методів у моніторингу якості повітря можна віднести гнучкість в умовах невизначеності, покращення якості обробки сенсорних даних, можливість використання у складних екологічних умовах.

Наведемо приклад оцінки якості повітря в Хмельницькій області за період 2016-2020 р.р., що базується на доступних даних, зокрема з міста Хмельницький [5]. Нижче представлено узагальнену інформацію щодо викидів основних забруднюючих речовин у атмосферу від стаціонарних джерел у місті Хмельницький за цей період (дані з 2021 року наразі недоступні).

Таблиця 2

Викиди забруднюючих речовин у місті Хмельницький (тис. тон)

Рік	Пил	Діоксид сірки (SO ₂)	Діоксид азоту (NO ₂)
2016	0,45	0,04	0,22
2017	0,42	0,041	0,22
2018	0,40	0,04	0,22
2019	0,36	0,036	0,22
2020	0,32	0,032	0,197

Проведемо аналіз динаміки викидів.

1. Пил. Спостерігається поступове зниження викидів пилу з 0,45 тис. тон у 2016 році до 0,32 тис. тон у 2020 році.

2. Діоксид сірки (SO₂). Викиди SO₂ зменшилися з 0,04 тис. тон у 2016 році до 0,032 тис. тон у 2020 році.

3. Діоксид азоту (NO₂). Викиди NO₂ залишалися стабільними на рівні 0,22 тис. тон з 2016 по 2019 роки, з незначним зниженням до 0,197 тис. тон у 2020 році.

Для візуалізації динаміки викидів забруднюючих речовин у місті Хмельницький за 2016–2020 роки побудуємо стовпчикову діаграму, яка відображає тенденції змін концентрацій пилу, діоксиду сірки (SO₂) та діоксиду азоту (NO₂).

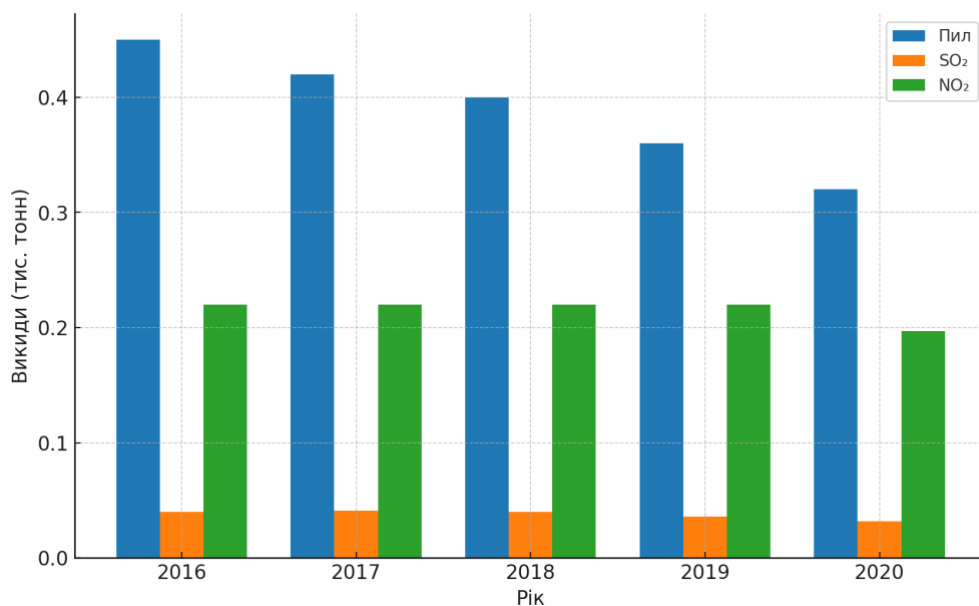


Рис. 1. Динаміка викидів забруднюючих речовин у м.Хмельницький

На сьогодні у зв'язку з воєнними діями багато статистичних даних закриті або взагалі відсутні. Наприклад, моніторинг якості повітря в Донецькій області за період 2017-2022 років ускладнений через активні бойові дії та обмежений доступ до деяких територій. Проте, на основі доступних даних можна надати узагальнену інформацію про динаміку викидів забруднюючих речовин в атмосферу від стаціонарних джерел у регіоні.

Таблиця 3

Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря Донецької області (тис. тон)

Рік	Викиди (тис. тон)
2017	784,85
2018	790,20
2019	773,50
2020	751,00
2021	744,10
2022	н/д

Примітка: Дані за 2017-2021 роки отримані з офіційних джерел. Інформація за 2022 рік відсутня через військову агресію та обмежений доступ до територій.

Проаналізуємо динаміку викидів.

1. 2017–2018 роки. Незначне збільшення викидів, пов'язане з нарощуванням потужностей промислових підприємств та переходом на альтернативні види палива.

2. 2019–2021 роки. Поступове зниження викидів, зумовлене виконанням природоохоронних заходів та спадом промислового виробництва.

3. 2022 рік. Значне зниження обсягів викидів через активні бойові дії, часткову окупацію територій та припинення діяльності підприємств.

На основі цих даних зробимо прогноз викидів забруднюючих речовин у Донецькій області методом інтелектуального аналізу даних (Data Mining) на основі теоретико-множинного підходу (нечітких множин) на 2024-2028 роки. Один із популярних методів – авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього (ARIMA), яка добре підходить для часових рядів.

Обґрунтування вибору методу ARIMA.

1. Дозволяє аналізувати залежності між попередніми значеннями ряду та враховувати тренди та сезонність.

2. Метод є ефективним навіть за обмеженою кількістю даних (як у випадку Донецької області).

3. Враховує випадкові коливання, які могли виникнути через зовнішні фактори, зокрема військові дії.

Проведемо прогнозування викидів забруднюючих речовин за доступними даними методом ARIMA.

Таблиця 4

Прогнозовані викиди забруднюючих речовин у Донецькій області (тис. тон) на 2024-2028 роки

Рік	Прогнозовані викиди (тис. тон)
2024	759.48
2025	782.38
2026	790.81
2027	776.69
2028	753.56

Аналіз прогнозу. У 2024 році спрогнозовано зростання викидів у порівнянні з 2021 роком (744.10 → 759.48 тис. тон). У 2025-2026 роках можливе подальше збільшення викидів, що може бути пов'язано з відновленням промисловості. У 2027-2028 роках прогнозується поступове зниження, що може свідчити про екологічні заходи або зміни у виробничих процесах.

Застосування теоретико-множинного підходу до моніторингу якості повітря є перспективним, оскільки цей метод дозволяє формально представити складні екологічні процеси у вигляді множин параметрів, їх взаємозв'язків та змін у часі.

Основні переваги підходу.

1. Формалізація складних систем:

– Дозволяє представити компоненти якості повітря у вигляді множин $\{PM_{2.5}, PM_{10}, SO_2, NO_2, CO, O_3\}$, що дає можливість проводити їх структурний аналіз.

– Дає змогу описати залежності між джерелами забруднення, екологічними параметрами та метеорологічними факторами.

2. Гнучкість у визначенні нечітких меж (нечітка логіка):

– Теоретико-множинний підхід може включати **нечіткі множини**, що дозволяють описувати якість повітря при невизначеності даних або нестачі спостережень.

– Наприклад, можна задати нечіткі множини для класифікації рівнів забруднення як {«чисте повітря», «помірне забруднення», «небезпечне»}.

3. Моделювання часових змін:

– Використання динамічних множин дозволяє відстежувати зміну якості повітря у часі, аналізувати довгострокові тенденції та прогнозувати майбутні стани системи.

– Зокрема, можна моделювати множини {Середньорічна концентрація забруднювачів} × {Роки} для аналізу трендів.

4. Інтеграція з методами Data Mining та машинного навчання:

– Множини можна використовувати як основу для кластеризації та побудови предиктивних моделей, що дозволяє підвищити точність прогнозів.

– Наприклад, методи кластеризації (K-means, DBSCAN) можуть допомогти у виявленні регіонів з найвищим рівнем забруднення.

5. Прогнозування та прийняття рішень:

– Використання операцій над множинами дозволяє проводити аналіз сценаріїв (Як зміняться рівні забруднення при введенні нових екологічних заходів? Які території потраплять у зону ризику при зміні кліматичних умов?)

– Застосування булевих операцій над множинами допомагає знаходити критичні точки, що потребують особливої уваги.

Теоретико-множинний підхід є ефективним інструментом для моніторингу та прогнозування якості повітря і змін у довкіллі. Його гнучкість у роботі з великими даними, нечіткими множинами та часовими рядами робить його перспективним у поєднанні з методами машинного навчання та інтелектуального аналізу даних.

Висновки

Використання теоретико-множинного підходу, особливо нечітких множин, у моніторингу якості повітря дозволяє підвищити точність аналізу та ефективність прийняття рішень. Перспективним напрямом є інтеграція цього методу у сучасні автоматизовані системи, що дасть змогу своєчасно реагувати на зміни у стані довкілля.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення інформаційних систем моніторингу якості повітря, прогнозуванні забрудненості повітря на заданий період, визначення та проведення необхідних організаційно заходів для дотримання якості повітря.

Література

1. Величко, О. М., & Зеркалов, Д. В. (2001). *Екологічний моніторинг: навч. посібник*. Київ: Науковий світ. 205 с.

2. Запорожець, А. О. (2017). Аналіз засобів моніторингу забруднення повітря навколишнього середовища. *Інформаційно-комунікаційні системи та мережі*, Т. 35, № 3. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11844>

3. Katushabe, C., Kumaran, S., & Masabo, E. (2021). Fuzzy Based Prediction Model for Air Quality Monitoring for Kampala City in East Africa. *Applied System Innovation*, 4(3), 44. <https://doi.org/10.3390/asi4030044>

4. Saleem, M., Shingari, N., Farooq, M. S., Mago, B., & Khan, M. A. (2024). Real-Time Air Quality Monitoring Model using Fuzzy Inference System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 15(6). The Science and Information Organization (Thesai).

5. Матюх, С. А., Міронова, Н. Г., & Дячук, А. О. (2022). *Коригування (внесення змін) генерального плану м. Хмельницький: розділ «Охорона навколишнього природного середовища» (Звіт про стратегічну екологічну оцінку)*. Хмельницький: ННЦ «Довкілля». 71 с.

References

1. Velychko, O. M., & Zerkalov, D. V. (2001). *Ekolohichniy monitorynh: navch. posibnyk*. Kyiv: Naukovyi svit. 205 s.

2. Zaporozhets, A. O. (2017). Analiz zasobiv monitorynhu zabrudnennia povitria navkolyshnoho seredovyshcha. *Informatsiino-komunikatsiini systemy ta merezhi*, T. 35, № 3. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11844>

3. Katushabe, C., Kumaran, S., & Masabo, E. (2021). Fuzzy Based Prediction Model for Air Quality Monitoring for Kampala City in East Africa. *Applied System Innovation*, 4(3), 44. <https://doi.org/10.3390/asi4030044>

4. Saleem, M., Shingari, N., Farooq, M. S., Mago, B., & Khan, M. A. (2024). Real-Time Air Quality Monitoring Model using Fuzzy Inference System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 15(6). The Science and Information Organization (Thesai).

5. Matiukh, S. A., Mironova, N. H., & Diachuk, A. O. (2022). *Koryhuvannia (vnesennia zmin) heneralnoho planu m. Khmelnytskyi: rozdil «Okhorona navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha» (Zvit pro stratchichnu ekolohichnu otsinku)*. Khmelnytskyi: NNTs «Dovkillia». 71 s.