

УДК 004.9+504.3.054

**В. Б. Мокін, д. т. н., проф., Є. М. Крижановський, к. т. н., доц.,
А. Р. Ящолт, к. т. н., доц., Д. О. Шмундяк**

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ РЕГІОНУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

У статті розроблена технологія проектування мережі спостережень якості атмосферного повітря регіону на основі методу аналізу ієрархій. Запропоновано новий підхід щодо визначення пріоритетності місць розташування пунктів спостереження за станом атмосферного повітря з використанням кососиметричної матриці парних порівнянь Сааті. Такий підхід дозволяє комплексно врахувати різні критерії вибору місць розташування пунктів спостережень, використовуючи наявні вхідні дані, а також враховуючи ваги кожного з критеріїв. Запропоновано комплекс критеріїв на основі відомої в Європі моделі «DPSIR»: критерії “Pressures” враховують близькість до стаціонарних джерел викидів, автострад тощо, критерії “States” враховують дані моніторингу стану довкілля, критерії “Impacts” враховують близькість розташування вразливого та іншого населення, критерії “Responses” відображають можливість відслідкувати ефективність різного роду заходів та ін. Розроблено рекомендації щодо застосування розробленої технології для території зон та агломерацій.

Наведено приклад застосування запропонованої технології під час розроблення Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря зони “Вінницька”, який довів працездатність цієї технології. Далі планується її розвивати у напрямку автоматизації етапу оброблення вхідних даних.

Ключові слова: технологія, система підтримки прийняття рішень, атмосферне повітря, ГІС, метод аналізу ієрархій, мережа пунктів спостережень, моніторинг атмосферного повітря, системний аналіз.

Вступ

В останні роки в Україні активно впроваджується директива ЄС “Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи” [1], спрямована на зменшення забруднення атмосферного повітря до такого рівня, що не буде шкідливого впливу на здоров'я людини. Передусім, для цього оптимізується система державного моніторингу атмосферного повітря. Цього вимагає і стаття 32 Закону України «Про охорону атмосферного повітря» [2], і Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря (далі – Порядок) затверджений постановою Кабінету Міністрів України [3]. Наказом Міністерства внутрішніх справ України [4] затверджено Порядок розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях України. А пункт 4 постанови [3] зобов'язує виконавчу владу та місцеве самоврядування розробити програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря (згідно вимог у наказі Міндовкілля України [5]), основним розділом яких є проектування мережі спостережень якості атмосферного повітря.

Зазначені вище документи [1 – 5] містять багато директив, інструкцій та рекомендацій щодо того які фактори слід враховувати та яких обмежень варто дотримуватись під час вибору місць для розташування пунктів спостережень. Однак немає чіткої методики чи технології як саме це слід робити, оперуючи доступними даними про регіон. Як правило, оптимальний вибір має високий рівень суб'єктивізму експертів, які розробляють і затверджують такого роду програми моніторингу. Наукові школи різних країн по-своєму вирішують таку задачу [6 – 9]. Враховуючи деякі обмеження в отриманні інформації про регіон, які мають місце в Україні, варто удосконалити ці технології.

Досвід авторів цієї статті, які вже розробили такі програми для агломерації «Вінниця» (повністю затверджена і викладена на сайті Вінницької міськради [10], яка є результатом НДР ВНТУ «Екологічний моніторинг в галузі охорони атмосферного повітря шляхом розробки «Програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Вінниця» на 2021 – 2025 роки»» [11]) та для зони «Вінницька», яка ще проходить розгляд (теж є результатом НДР ВНТУ «Розробка розділів програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря Вінницької області», номер держреєстрації 0121U110737), показав, що може існувати декілька десятків місць розташування пунктів, оптимальних за різними критеріями. У той же час, критерії можна структурувати у певні групи, виділивши, власне критерії, та інтегральні критерії. Частина критеріїв визначається кількісно і це можна автоматизувати, частина – експертно. Як відомо, за таких умов, ефективно працюють методи системного аналізу, зокрема – метод аналізу ієрархій [12 – 15]. Такі методи дозволяють ранжувати багато варіантів, які враховують інформацію про велику кількість ієрархічно структурованих критеріїв і дають максимально обґрунтовану відповідь щодо заданої мінімальної кількості пунктів по заданих групах показників, принаймні вкажуть, які слід проектувати першочергово.

Метою статті є підвищення обґрунтованості вибору місць розташування пунктів мережі спостережень якості атмосферного повітря регіону шляхом розроблення технології їх проектування за ранжуванням можливих місць і визначенням їх першочергового розміщення на основі опрацювання доступної в Україні публічної інформації.

Аналіз доступної інформації по регіонах України про якість атмосферного повітря

Наказ Міндовкілля України [5] вимагає збирання та опрацювання певної інформації. В Україні існують спеціальні установи, які ведуть такі дані та надають їх за запитом про публічну інформацію. Не завжди така інформація є у повному обсязі. Були систематизовані основні види необхідної інформації. Визначено які саме її аспекти є доступними у відповідях на публічні запити із практичного досвіду авторів статті, набутого під час розроблення програм для агломерації та зони, а також під час створення раніше інформаційних аналітичних систем про природні ресурси та забруднення регіонів України. У таблиці 1 наведено ці види інформації із зазначенням можливої невизначеності, коли інформація є, але вона не зовсім точно відповідає наказу Міндовкілля і усунути цю проблему неможливо. Пропонуємо одразу групувати і позначати ці критерії по видах, відповідно до складових відомої в Європі моделі «DPSIR» – це причинно-наслідкова модель для опису взаємодії суспільства та довкілля, прийнята Європейським агентством з навколишнього середовища (англ. – European Environment Agency (EEA)): «Driving forces» (з англ. – «Рушійні сили» – джерела забруднення, які здійснюють тиск на довкілля та ін.), «Pressures» (з англ. – «Тиск, навантаження» – безпосереднє антропогенне навантаження у вигляді стаціонарних джерел викидів, паління листя та ін.), «States» (з англ. – «Стани» – дані моніторингу стану довкілля та ін.), «Impacts» (з англ. – «Наслідки» – наслідки у вигляді захворюваності населення тощо, «Responses» (з англ. – «Реакція, відповіді» – різні контрольні заходи, штрафи, прийняття рішень тощо) [16].

Таблиця 1

Формалізація інформації у відповідях запитів на публічну інформацію, збирання якої вимагає наказ Міндовкілля [5]

Код	Вид інформації	Джерело	Доступна інформація	Невизначеність та недоліки
D1	Інформація про кількість населення	Головне управління статистики області	Кількість населення по роках	1. Як правило, інформація доступна тільки за повні роки, наприклад, в кінці 2021 р. вона є тільки за 2020 р.
D2	Інформація про найбільших забруднювачів довкілля	Головне управління статистики області	Назви, адреси підприємств	1. Як правило, інформація доступна тільки за повні роки, наприклад, в кінці 2021 р. вона є тільки за 2020 р., 2. Інформація є тільки по підприємствах, які звітують згідно форми 2-ТП «Повітря».
P1	Координати місць розташування виробничих потужностей підприємств, які є у списку D1	Орган облдержадміністрації, відповідальний за управління якістю атмосферного повітря та Міндовкілля України	Адреси чи GPS-координати центрів усіх майданчиків виробничих потужностей із дозволів на гранично допустимі викиди	1. Частина дозволів видає Міндовкілля, частину – обласні органи і буває складно знайти де саме знаходиться потрібний дозвіл. 2. Часто надаються не координати, а адреса будівлі, однак, не завжди є впевненість, що це – саме адреса викидів, а не – офісу підприємства, розташованому, як правило, в іншому місці.
S1-01 ... S1-N	Значення Nпоказників якості атмосферного повітря	Обласний центр з гідрометеорології Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС)	Усереднені за добу значення концентрації N показників на невеликій кількості пунктів	1. Документи [1 – 5] містять вимоги щодо показників PM2.5 і PM10 (тверді частки пилу, розміром 2.5 і 10 мкм, відповідно), а ДСНС та МОЗ, як правило, вимірюють тільки недиференційований пил, який з порогамі PM2.5 і PM10 не порівняєш. Тому є сенс на початковому етапі враховувати перевищення й гранично допустимих концентрацій (ГДК). 2. Різні суб'єкти моніторингу можуть вимірювати показники за різними методиками, що ускладнює їх порівняння. Крім того, по більшості показників ДСНС усереднює дані, які спостерігає весь час в одному місці, а лабораторії МОЗ, як правило, роблять епізодичні вимірювання, але на великій (сотні точок в одній області) мережі спостережень.
S2-01-M	Значення Mпоказників якості атмосферного повітря	Обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я України	Значення концентрації M показників у багатьох пунктах, але за порівняно невелику кількість діб	
II	Кількість вразливого населення в регіоні	Головне управління статистики області	Кількість вразливого населення в регіоні по роках.	1. Як правило, інформація доступна тільки за повні роки, наприклад, в кінці 2021 р. вона є тільки за 2020 р.

Охарактеризовані у табл. 1 проблеми невизначеності даних призводять до неможливості розроблення методики ранжування місць, оснований тільки на кількісних даних із відповідей на запити до відповідних установ – потрібні консолідовані підходи, коли частина інформації отримується експертним шляхом.

Вибір та структурування критеріїв для пріоритетного вибору місць розташування пунктів мережі спостереження за якістю атмосферного повітря регіону

Метод аналізу ієрархій був запропонований Сааті ще у 1990 р. [12, 13]. Є велика кількість його варіацій, розвитку та прив'язки до різних задач і проблем. Пропонуємо взяти за основу статтю одного із співавторів цієї статті – статтю [14], основу на роботі [15], в якій наведена покрокова реалізація цієї технології.

Відповідно до методології статті [14], пропонується використати технологію синтезу системи підтримки прийняття рішень (СППР) з використанням косиметричної матриці парних порівнянь Сааті, яка для її максимального рангу буде мати вигляд [14]:

$$C = [C_{ij}]; i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 9,$$

$$c_{ij} = \frac{1}{c_{ji}}, \quad (1)$$

де c_{ij} — ступені переваги факторів, які встановлюються експертом при парному порівнянні цих факторів між собою від $c_{ij} = 1$ (перевага фактору i над фактором j відсутня) до $c_{ij} = 9$ (перевага абсолютна).

Для визначення експертних оцінок ваг критеріїв і їх підкритеріїв використаємо оцінки співавторів статті та різні коментарі членів комісії агломерації «Вінниця» та комісії Міндовкілля, які озвучувались на різних нарадах, присвячених розгляду програм регіонів (різних агломерацій і зон), та у різного роду документах, які поширювались серед органів управління якістю атмосферного повітря в регіонах країни.

На основі проведеного вище аналізу можна вибрати 25 критеріїв $\Phi_{ij}; i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 5$, згрупованих у 5 інтегральних критеріїв $\Phi_i; i = 1, 2, \dots, 5$.

Аналіз документів [1 – 5] показав, що основними критеріями, які варто враховувати під час вибору місць розташування пунктів мережі спостережень за якістю атмосферного повітря регіону, є такі [11]:

- щільність та обсяги викидів стаціонарних і пересувних джерел викидів;
- місця розташування та частота підвищених значень усереднених та максимальних разових показників стану повітря, у т.ч. визначених шляхом інтерполяції та методами геостатистичного аналізу карт розподілу цих показників;
- близькість до місць проживання вразливих верств населення;
- рівномірність охоплення території регіону для побудови в майбутньому карт розподілу забруднювальних речовин;
- зручність інфраструктури та умов для обслуговування пунктів спостережень.

Крім того, варто врахувати складові моделі «DPSIR» та інформацію таблиці 1. Тож, інтегральними критеріями пропонуємо такі:

Φ_1 – близькість до найбільш впливових джерел забруднення атмосферного повітря (група Р-критеріїв – «Pressures»);

Φ_2 – частота та рівень перевищень усереднених та максимальних разових показників стану атмосферного повітря та атмосферних опадів (група S-критеріїв – «States»);

Φ_3 – близькість до стейкхолдерів (населення, у т.ч. вразливого, інвестиційних об'єктів тощо) (група I-критеріїв – «Impacts», інвестиції можна умовно розглядати як непрямі позитивні «наслідки» – у більш чистих регіонах більше інвестують, оскільки меншими будуть витрати на покращення здоров'я працівників, на фільтри у вентиляційних системах та ін.);

Φ_4 – рівень репрезентативності запроваджених керівних заходів (встановлені очисні системи, введений контроль за викидами пересувних транспортних заходів тощо) (група R-критеріїв – «Responses»);

Φ_5 – зручність інфраструктури, умов для обслуговування пунктів спостережень, цінність для рівномірного охоплення регіону, що спростить побудову карт забруднення в майбутньому та ін. (група допоміжних критеріїв).

Аналіз експертних оцінок парних порівнянь цих критеріїв, тобто визначення того, який є важливішим із кожної їх пари, дозволив визначити таку матрицю Сааті $C^{(0)}$, наведену у табл. 2.

Таблиця 2

Матриця $C^{(0)}$

Інтегральні критерії	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
Φ_1	1	2	5	6	6
Φ_2	$\frac{1}{2}$	1	3	4	4
Φ_3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	4	2
Φ_4	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	1	2
Φ_5	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1

За окремими критеріями будемо позначати «(експертно)» ті, які важко автоматизувати за наявними в Україні відкритими даними. Решту можна пробувати автоматизувати з використанням баз даних, геоінформаційних технологій та ін.

У 1-му інтегральному критерії пріоритетного вибору місць розташування пунктів спостережень якості атмосферного повітря регіону базовими критеріями є такі:

Φ_{11} – сумарний обсяг стаціонарних джерел викидів підприємств в останній із наведених років зі списку найбільших забруднювачів повітря регіону у певному околі (наприклад у колі, площею 1/100 чи 1/1000 від площі регіону);

Φ_{12} – сумарний обсяг гранично допустимих викидів підприємств в останній із наведених років зі списку найбільших забруднювачів повітря регіону у певному околі;

Φ_{13} – кількість центроїдів виробничих майданчиків у певному околі;

Φ_{14} – близькість до автостради міжнародного чи регіонального значення або дороги з високою завантаженістю пересувними транспортними засобами у години «пік», передусім вантажними (експертно);

Φ_{15} – ступінь близькості від пункту до геометричного центра сусіднього населеного пункту або території з найбільшою кількістю стаціонарних джерел викидів.

Аналіз експертних оцінок парних порівнянь цих критеріїв, дозволив визначити таку матрицю Сааті $C^{(0)}$, наведену у табл. 3.

Таблиця 3

Матриця $C^{(1)}$

Критерії	Φ_{11}	Φ_{12}	Φ_{13}	Φ_{14}	Φ_{15}
Φ_{11}	1	4	7	8	9
Φ_{12}	$\frac{1}{4}$	1	4	7	9
Φ_{13}	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{4}$	1	2	9
Φ_{14}	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	1	9
Φ_{15}	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	1

У 2-му інтегральному критерії пріоритетного вибору місць розташування пунктів спостережень якості атмосферного повітря регіону базовими критеріями є такі:

Φ_{21} – відсоток перевищень середньодобової ГДК показника у точках у певному околі (наприклад у колі, площею 1/100 чи 1/1000 від площі регіону);

Φ_{22} – відсоток перевищень максимально разової ГДК показника у точках у певному околі;

Φ_{23} – відсоток перевищень нижнього порогу оцінювання показника у точках у певному околі;

Φ_{24} – відсоток перевищень верхнього порогу показника у певному околі;

Φ_{25} – відсоток перевищень ГДК за супутниковими даними та/або даними громадського моніторингу атмосферного повітря у певному околі

Аналіз експертних оцінок парних порівнянь цих критеріїв, дозволив визначити таку матрицю Сааті $C^{(2)}$, наведену у табл. 4.

Таблиця 4

Матриця $C^{(2)}$

Критерії	Φ_{21}	Φ_{22}	Φ_{23}	Φ_{24}	Φ_{25}
Φ_{21}	1	2	3	7	9
Φ_{22}	$\frac{1}{2}$	1	3	3	9
Φ_{23}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	4	9
Φ_{24}	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	1	9
Φ_{25}	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	1

У 3-му інтегральному критерії пріоритетного вибору місць розташування пунктів спостережень якості атмосферного повітря регіону базовими критеріями є такі:

Φ_{31} – близькість до інтенсивної забудови багатопверхових житлових масивів міст, км;

Φ_{32} – близькість до місць розташування найбільш вразливого населення: санаторіїв, лікарень, шкіл, дитсадків тощо (експертно);

Φ_{33} – близькість до наявних інвестиційних об'єктів, км;

Φ_{34} – близькість до потенційних інвестиційних об'єктів (експертно);

Φ_{35} – близькість до органів самоврядування (міськрад, сільрад) та інших місць, де часто зустрічають різні делегації, у т.ч. іноземні, км.

Аналіз експертних оцінок парних порівнянь цих критеріїв, дозволив визначити таку матрицю Сааті $C^{(3)}$, наведену у табл. 5.

Таблиця 5

Матриця $C^{(3)}$

Критерії	Φ_{31}	Φ_{32}	Φ_{33}	Φ_{34}	Φ_{35}
Φ_{31}	1	2	7	8	9
Φ_{32}	$\frac{1}{2}$	1	5	8	9
Φ_{33}	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	1	7	9
Φ_{34}	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{7}$	1	9
Φ_{35}	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	1

У 4-му інтегральному критерії пріоритетного вибору місць розташування пунктів спостережень якості атмосферного повітря регіону базовими критеріями є такі:

Φ_{41} – близькість до об'єктів, де нещодавно були встановлені очисні споруди та проведено інші заходи зі зниження забруднення атмосферного повітря, у т.ч. асфальтування доріг та інших дорожньо-транспортних робіт, заходів з оптимізації дорожнього руху тощо (експертно);

Φ_{42} – близькість до об'єктів, де планується встановити очисні споруди чи провести інші заходи зі зниження забруднення атмосферного повітря, у т.ч. асфальтування доріг та інших дорожньо-транспортних робіт, заходів з оптимізації дорожнього руху тощо (експертно);

Φ_{43} – близькість до місць, де запроваджено контроль за викидами пересувних джерел, за вагою вантажних засобів та ін., км;

Φ_{44} – близькість до об'єктів природно-заповідного фонду або сільської місцевості (для зон);

Φ_{45} – близькість до паркових зон чи зон з обмеженим рухом для вантажного транспорту.

Аналіз експертних оцінок парних порівнянь цих критеріїв, дозволив визначити таку матрицю Сааті $C^{(4)}$, наведену у табл. 6.

Таблиця 6

Матриця $C^{(4)}$

Критерії	Φ_{41}	Φ_{42}	Φ_{43}	Φ_{44}	Φ_{45}
Φ_{41}	1	2	3	3	4
Φ_{42}	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4
Φ_{43}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	4	4
Φ_{44}	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	1	3
Φ_{45}	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	1

У 5-му інтегральному критерії пріоритетного вибору місць розташування пунктів спостережень якості атмосферного повітря регіону базовими критеріями є такі:

Φ_{51} – зручність для обслуговування вимірювального обладнання пункту (експертно);

Φ_{52} – зручність інфраструктури для встановлення вимірювального обладнання пункту (експертно);

Φ_{53} – цінність для рівномірного охоплення регіону, що спростить побудову карт забруднення в майбутньому (експертно);

Φ_{54} – цінність для моніторингу за якістю атмосферного повітря регіону на думку органу, відповідального за моніторинг якості атмосферного повітря (експертно);

Φ_{55} – цінність для контролю за регулярними порушниками умов, які прописані в дозволах підприємств цього регіону, на думку органу, відповідального за екоінспекційний контроль якості атмосферного повітря (експертно).

Аналіз експертних оцінок парних порівнянь цих критеріїв, дозволив визначити таку матрицю Сааті $C^{(5)}$, наведену у табл. 7.

Таблиця 7

Матриця $C^{(5)}$

Критерії	Φ_{51}	Φ_{52}	Φ_{53}	Φ_{54}	Φ_{55}
Φ_{51}	1	1	2	2	7
Φ_{52}	$\frac{1}{1}$	1	2	2	6
Φ_{53}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2	6
Φ_{54}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	5
Φ_{55}	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	1

Алгоритм застосування методу аналізу ієрархій до запропонованих критеріїв

До визначених у попередньому розділі критеріїв та експертних оцінок застосовуємо стандартний алгоритм методу аналізу ієрархій. Є декілька алгоритмів його застосування. Пропонується використати алгоритм зі статті [14]. Як відомо, за цим методом знаходять максимальне дійсне додатнєвласне число λ_{max} кожної C -матриці та власні вектори w^j для нього ($j = 0 \dots n$) та розв'язують систему матричних рівнянь виду [14]

$$[C^{(j)} - \lambda_{max}^{(j)} I] [w^{(j)}] = 0, \text{ де } j = 1 \dots n.$$

При цьому, необхідно замінити одне з рівнянь на таке [14]:

$$w_1^j + w_2^j + \dots + w_n^j = 1.$$

Розв'язавши систему рівнянь, ми отримуємо ваги критеріїв $w_i^{(j)}$, $\text{де } j = 1 \dots n$ та можемо використати їх для обчислення значень інтегральних факторів та кожного базового фактору за допомогою наступних формул [14]:

$$K_j = w_j^{(0)} K_{nn}^*, \text{ де } j = 1 \dots n,$$

$$K_{ji} = w_j^{(0)} w_i^{(j)} K_{nn}^*, \text{ де } j = 1 \dots n, i = 1 \dots n.$$

Блок-схема алгоритму запропонованої технології наведена на рис. 2.

Технологія застосовується для кожного показника якості атмосферного повітря та атмосферних опадів окремо. Спочатку збираємо дані, потім за кожним критерієм визначаємо 3 – 5 оптимальних місць (наприклад, за Φ_{11} – де найбільше стаціонарних джерел викидів, за Φ_{32} – де найбільше лікарень, санаторіїв, шкіл і дитсадків, за Φ_{51} та Φ_{52} – у пунктах, де вже є стаціонарні пости, наприклад ДСНС України, або місця, де регулярно проводить вимірювання МОЗ, та ін.), формуємо єдиний список з усіх цих місць, проводимо розрахунки, ранжуємо усі місця за цим показником, відбираємо з них першочергові для встановлення. Потім можна додати ранги цих місць по усіх показниках і вибрати найбільш пріоритетні місця одночасно за усіма показниками. Іноді краще в одному місці вимірювати пил, в другому – важкі метали, у третьому – озон (давач на озон – порівняно дешевий, його можна й в усіх пріоритетних місцях вимірювати), у четвертому – якість атмосферних опадів. Це вже – на розсуд проектувальників та комісії зони чи агломерації.

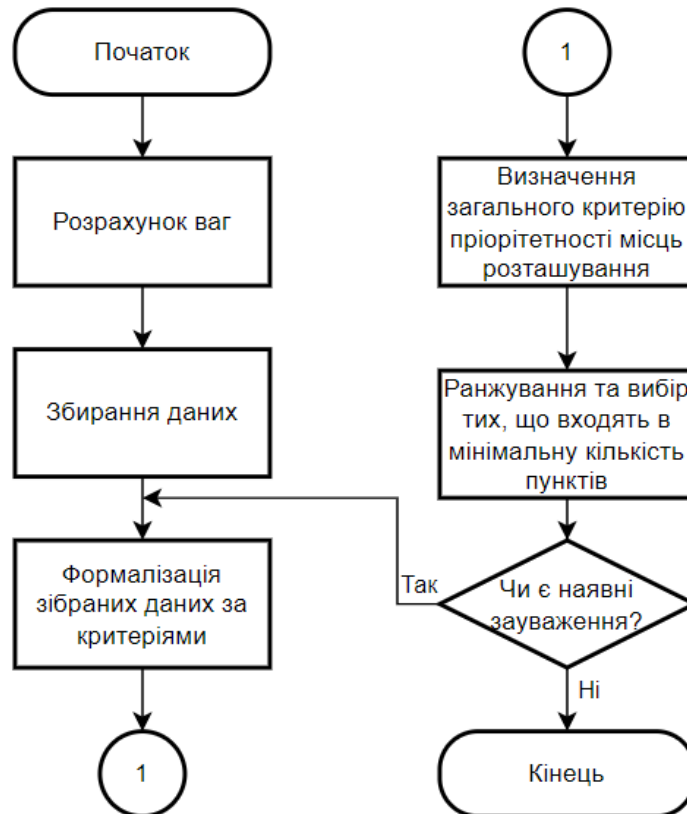


Рис. 2. Блок-схема алгоритму запропонованої технології проектування мережі спостережень якості атмосферного повітря регіону на основі методу аналізу ієрархій

Приклад застосування розробленої інформаційної технології

Розглянемо приклад застосування запропонованої технології на прикладі проектування мережі пунктів спостереження якості атмосферного повітря зони «Вінницька», межі якої, згідно з постановою [3], збігаються з межами Вінницької області.

Використовуючи запропонований алгоритм (див. блок-схему на рис. 2) та зібрану публічну інформацію й експертні оцінки, були вибрані по 3 оптимальні для кожного з 25 критеріїв пункти спостережень (часто вони повторювались) та для усіх розраховані значення усіх критеріїв. Результат їх агрегування в інтегральні критерії наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Результат оцінювання пунктів спостережень

№ п/п	Критерії та пункти	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	J
	Ваги критеріїв	0,5	0,3	0,14	0,07	0,058	1,0
1	Центр м. Ладижин	4,43	2,70	1,29	0,5	0,45	9,365
2	На в'їзді в м. Гайсин біля траси	4,24	2,70	0,75	0,6	0,55	8,821
3	смт. Іллінці	3,55	2,69	0,56	0,4	0,24	7,402
4	Центр м. Хмільник	0,95	0,27	1,15	0,4	0,42	3,152
5	м. Калинівка біля траси	0,78	1,36	0,25	0,4	0,37	3,131
6	с. Немія біля м. Могилів-Подільський	1,06	0,81	0,54	0,5	0,21	3,110
7	м. Могилів-Подільський	1,04	1,07	0,43	0,3	0,24	3,082
8	У центрі м. Немирів	0,96	0,53	0,69	0,3	0,30	2,728
9	м. Жмеринка, біля залізничного вокзалу	0,92	0,53	0,26	0,3	0,42	2,395
10	с. Іванів	0,91	0,32	0,16	0,2	0,22	1,790

На рис. 4 відображено 6 найкращих пунктів спостережень, де колір кола є пропорційним рівню пріоритетності відповідного пункту.

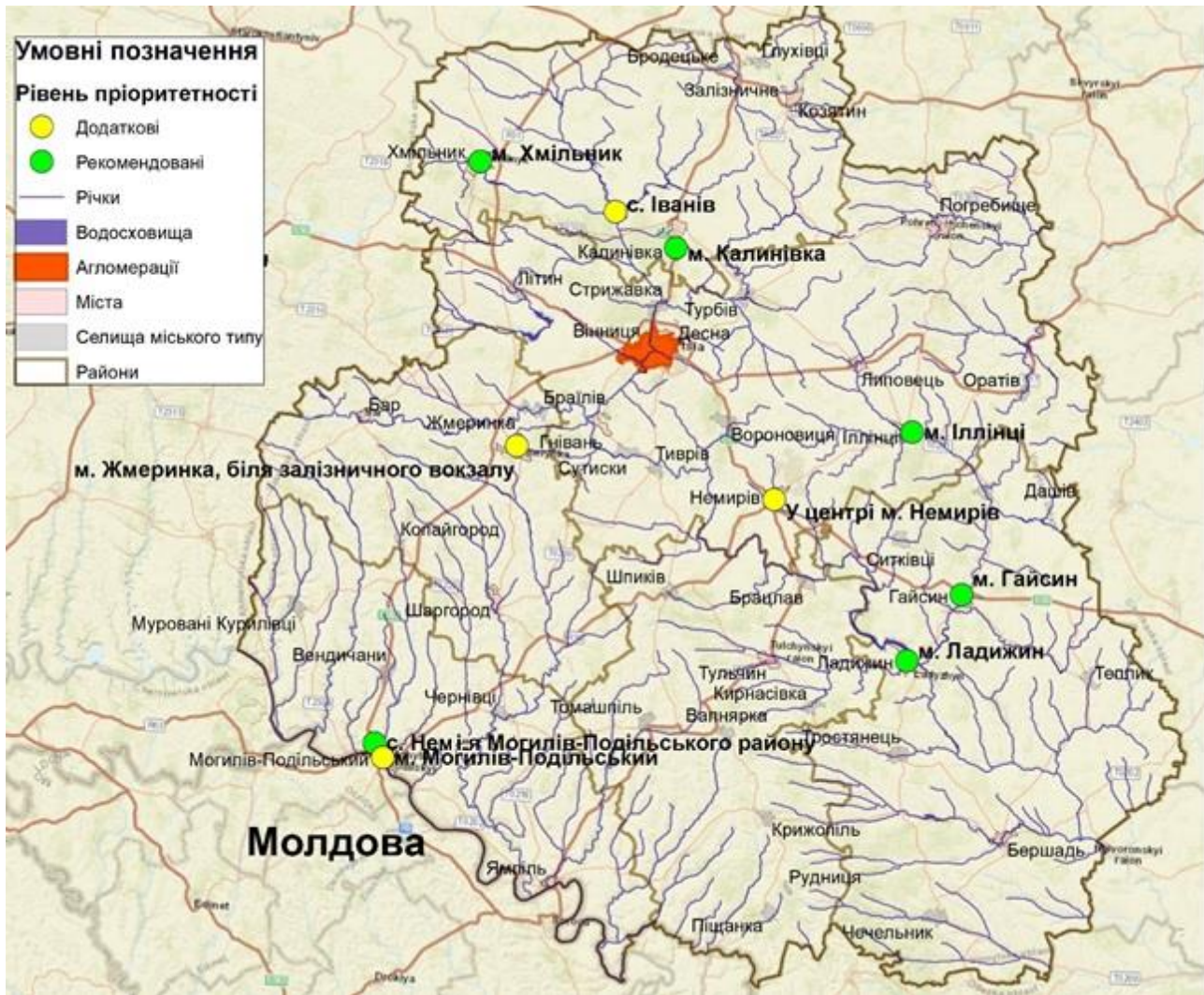


Рис. 4. Карта візуалізації пріоритетності проєктних пунктів спостережень зони «Вінницька»

Висновки

В цій статті описано розроблення технології проєктування мережі спостережень якості атмосферного повітря регіону на основі методу аналізу ієрархій. Запропоновано новий підхід щодо визначення пріоритетності місць розташування пунктів спостереження за станом атмосфери з використанням косиметричної матриці парних порівнянь Сааті.

Такий підхід дозволяє комплексно врахувати різні критерії вибору місць розташування пунктів спостережень, використовуючи наявні вхідні дані, а також враховуючи ваги кожного з критеріїв та інтегральних критеріїв, які вибрані, з урахуванням вимог європейського та вітчизняного законодавства і відомої в Європі моделі «DPSIR».

Розроблено рекомендації щодо застосування цієї технології для територій зон та агломерацій.

Наведено приклад застосування запропонованої технології під час розроблення Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря зони «Вінницька», який довів працездатність цієї технології.

Далі планується розвивати цю технологію у напрямку автоматизації етапу оброблення вхідних даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Директива ЄС «Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи»[Електронний ресурс]/Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text.

2. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 № 2707-ХІІ Редакція від 05.08.2021. [Електронний ресурс]/ Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>.
3. Постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 827 «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» [Електронний ресурс]/ Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/KP190827.html.
4. Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 21.04.021 р. № 300 «Про затвердження Порядку розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях» [Електронний ресурс]/Режим доступу:http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE36257.html.
5. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 25.02.2021 р. № 147 «Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України Про затвердження форми Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря»[Електронний ресурс]/ Режим доступу:<https://mepr.gov.ua/documents/3399.html>.
6. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network [Electronic resource] / M. G. Schultz, H. Akimoto, J. Bottenheim, B. Buchmann [et al.] // Elementa Science of the Anthropocene. – 2015. – № 3. – Access mode : <https://online.ucpress.edu/elementa/article/doi/10.12952/journal.elementa.000067/112741/The-Global-Atmosphere-Watch-reactive-gases>. – <http://doi.org/10.12952/journal.elementa.000067>.
7. Air Quality Monitoring Network for Tracking Pollutants : the Case Study of Salerno City Center [Electronic resource] / D. Sofia, A. Giuliano, F. Gioiella // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – № 68. – P. 67 – 72. – Access mode : <https://www.aidic.it/cet/18/68/012.pdf>.
8. Optimizational task solution of stationary points placement for observation of atmospheric pollution at technogenically loaded territories of Ukraine / O. Popov, V. Artemchuk, A. Iatsyshyn [et al.] // Geochemistry of Technogenesis. – 2020. – № 4 (2020). – P. 86 – 95.
9. Shareef M. Optimization of Air Quality Monitoring Network Using GIS Based Interpolation Techniques/ M. Shareef, T. Husain, B. Alharbi // Journal of Environmental Protection. – 2016. – № 7. – P. 895 – 911. – doi: 10.4236/jep.2016.76080.
10. Програма державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Вінниця» на 2021 – 2025 роки [Електронний ресурс] / Режим доступу : <https://www.vmr.gov.ua/media/%D0%A1%D0%B5%D1%80%D0%B2%D1%96%D1%81%D0%B8/Ecology/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B0%20%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BD%D1%82%2026.11.21.pdf>.
11. Екологічний моніторинг в галузі охорони атмосферного повітря шляхом розробки «Програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Вінниця» на 2021-2025 роки». Звіт про НДР № 2858, Вінницький національний технічний університет / [В. Б. Мокін, С. М. Крижановський, А. Р. Ящолт та ін.]. – Київ, 2021. – 144 с.
12. Saaty T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process/ T. L. Saaty // European Journal of Operational Research.– 1990. – № 48. – P. 9 – 26.
13. Saaty T. L. Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty. – Pittsburgh : RWS Publ., 1996. – 287 p.
14. Mokin B. I. Decision Support System For The Use Of Funds Received From Higher Education Institution Paid Services / B. I. Mokin, V. B. Mokin, Yu. V. Mokina // Actual Problems in Economics. – 2016. – № 3 (177). – P. 372 – 383.
15. Герасимов Б. М. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности / Б. М. Герасимов, М. М. Дивизинюк, И. Ю. Субач. – Севастополь: Государственный Океанариум, 2004. – 320 с.
16. European Environment Agency Glossary [Електронний ресурс] / Режим доступу : <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/dpsir>.
17. Dan Margalit, Joseph Rabinof. Interactive Linear Algebra [Електронний ресурс] / Режим доступу:<https://textbooks.math.gatech.edu/ila/ila.pdf>.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2021.

Стаття пройшла рецензування 29.12.2021.

Мокін Віталій Борисович – д. т. н., професор, завідувач кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Крижановський Євгеній Миколайович – к. т. н., доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Яцолт Андрій Русланович – к. т. н., доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Шмундяк Дмитро Олександрович – аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Вінницький національний технічний університет.