

*Запропоновано математичну модель для визначення раціонального розміщення мережі постів моніторингу за забрудненням приземного шару атмосфери міста, в якій враховано недоліки існуючих аналогів*

*Ключові слова: моніторинг атмосферного повітря, математична модель*

*Предложена математическая модель для определения рационального размещения сети постов мониторинга за загрязнением приземного слоя атмосферы города, учитывающая недостатки существующих аналогов*

*Ключевые слова: мониторинг атмосферного воздуха, математическая модель*

*The mathematical model is offered to determine the rational distribution network of monitoring posts of pollution of surface air, which takes into account shortcomings of existing analogs*

*Keywords: monitoring of atmospheric air, mathematical model*

# МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ МЕРЕЖІ ПСЗ АТМОСФЕРИ МІСТА

**І. П. Каменева**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник\*  
Контактний тел.: (044) 424-91-68

**А. В. Яцишин**

Кандидат технічних наук, завідувач тематичної групи  
Група екологічного аналізу та прогнозу\*  
Контактний тел.: (044) 424-91-68

E-mail: andic@ua.fm

**В. О. Артемчук**

Аспірант\*  
Контактний тел.: (044) 424-91-68  
E-mail: ak24avo@gmail.com

\*Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г.Є. Пухова НАН України  
вул. Генерала Наумова, 15, м. Київ, Україна, 03164

**О. О. Попов**

Кандидат технічних наук, викладач  
Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова  
Національного авіаційного університету  
пр. Миру, 22, м. Житомир, Україна, 10004

## 1. Вступ

Чисте атмосферне повітря є непорушною умовою для здорового життя. Разом з тим, більшість найважливіших видів діяльності людини, пов'язаних з соціально-економічним розвитком, приводять до забруднення повітряного басейну середовища життєдіяльності більшості населення.

Зусилля по запобіганню факторів ризику, обумовленого забруднюючими речовинами, виявляються особливо результативними, якщо вдається виявити і відстежувати конкретний характер експозиції населення одночасно з вживанням заходів по запобіганню або зменшенню забруднення.

Одним з найважливіших напрямів діяльності в цій сфері є моніторинг атмосферного повітря. Але, як зазначається у концепції державної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища [1], функціонування державної системи моніторингу довіклля, і зокрема атмосферного повітря, України на даний час є незадовільним. Основною причиною такого стану є те, що з часу створення діючої мережі спостереження за атмосферним повітрям не проводилася робота по розгляду або перегляду її діяльності.

Мережа моніторингу якості повітря, яка використовується в Україні на теперішній час, встановлена в 70-их роках минулого сторіччя, відповідно до стандартів колишнього СРСР. Схеми розміщення станцій (постів) моніторингу та їх кількість, методи відбору та аналізу проб реалізовані згідно положення [2], прийнятого в колишньому Радянському Союзі в 1989 році, яким керуються по теперішній час.

До основних недоліків, що зумовлюють низьку ефективність функціонування системи моніторингу, слід віднести:

- відсутність єдиної мережі спостережень;
- застаріле технічне і методичне забезпечення спостережень;
- відсутність сучасного технічного оснащення центрів системи моніторингу в більшості регіонів;
- неузгодженість окремих елементів інформаційних технологій, що використовуються суб'єктами системи моніторингу;
- неповна відповідність нормативно-технічного та нормативно-правового забезпечення системи моніторингу сучасним вимогам.

Все це в, свою чергу, практично не залишає можливостей для ефективного управління якістю повітря на регіональному рівні. Таким чином, склалися умо-

ви, які не сприяють запобіганню негативним змінам стану довкілля та дотриманню вимог екологічної безпеки, що призводить до негативних наслідків для оточуючого середовища і, зокрема, для здоров'я населення.

Аналіз можливих шляхів розв'язання проблеми дає підстави для висновку, що здійснити це можна або на основі створення нової мережі спостережень (без врахування вже існуючих станцій), що потребує занадто великого обсягу коштів для фінансування, або шляхом удосконалення існуючої мережі.

На даний час переважна більшість наукових праць, в яких запропоновано певні підходи щодо модернізації існуючої системи моніторингу атмосфери України, носять або надто концептуальний характер, або стосуються інженерної складової даної проблеми, тобто розробки програмного та апаратного забезпечення вимірювального обладнання.

Забезпечення і контроль якості атмосферного повітря не вичерпуються, при всій їх важливості, чисто метрологічними аспектами і повинні пронизувати весь технологічний ланцюжок моніторингу, починаючи з планування мережі, через всі елементи її функціонування, і закінчуючи підготовкою і розповсюдженням інформаційної продукції.

Але на даний час фактично не досліджується питання щодо планування просторової структури мережі спостережень, тобто залишається відкритою проблема її оптимального розташування: визначення раціональних місць для розміщення пунктів спостереження за забрудненням (ПСЗ) та їх кількості, враховуючи обмеження економічного, технічного та інших рівнів.

Раніше удосконалення системи моніторингу зводилося лише до збільшення числа ПСЗ, проте правильність такого підходу викликає все більше сумнівів. В першу чергу доцільно досліджувати економічні показники ефективності мережі і питання її оптимізації. Особливий інтерес представляють роботи, пов'язані з оцінками впливу синоптичних ситуацій на конфігурацію мережі. Враховуючи наявні можливості для побудови мереж гнучкої конфігурації з використанням мобільних станцій, це питання набуває ще більшої актуальності.

Отже, не зважаючи на певну кількість робіт, що піднімають питання техніко-економічного обґрунтування розвитку мережі моніторингу в умовах впливу великого числа чинників, в першу чергу метеорологічних, можна констатувати, що ці питання із залученням сучасних методів дослідження операцій детальніше не розглядалися. В той же час, застосування методів дослідження операцій створює нові перспективи для удосконалення процесу вибору стратегій моніторингу досліджуваних об'єктів, що забезпечує більш об'єктивну економічну основу для прийняття управлінських рішень в галузі екологічної безпеки.

---

## 2. Підходи до оптимізації мережі моніторингу забруднення атмосфери

---

Найбільше поширення при вирішенні задач оптимізації мережі моніторингу забруднення атмосфери

набув метод, розроблений для оптимізації мережі метеорологічних і аерологічних станцій, який використовує ймовірно-статистичний підхід. Критерієм оптимізації тут є вимога мінімуму середньої квадратичної помилки відновлення значення концентрації забруднюючої речовини в певній точці простору і в певний момент часу. Виходячи з цієї вимоги, визначається оптимальна відстань між постами. Метод вперше висунутий в роботах О.А. Дроздова і А.П. Шепелевського [3 та ін.], і надалі істотно узагальнений і доповнений стосовно мережі метеорологічних станцій і мережі моніторингу забруднення атмосфери.

Слід відзначити, що використання «метеорологічного» підходу передбачає оптимізацію по одній конкретній речовині. В той же час, на постах моніторингу забруднення атмосфери можуть одночасно вимірюватися концентрації дванадцяти і більш інгредієнтів [2]. Оптимізація лише по одному з них абсолютно не відповідає вимогам підвищення ефективності роботи мережі моніторингу. Цей підхід також передбачає наявність достатньо великого обсягу заздалегідь накопиченої інформації про концентрації того чи іншого інгредієнта, тобто, фактично, придатний лише для оптимізації вже існуючої мережі, хоча при цьому не враховує перспективу розвитку міста.

Існують й інші підходи до оптимізації мережі моніторингу забруднення атмосфери. Кожен з них має свої переваги і недоліки. Так, «економічний підхід» (тобто, використання економічних критеріїв) вважається найбільш адекватним, але найменш придатним для впровадження, оскільки точне визначення збитку за відсутності або наявності поста спостереження є досить важкою задачею, що потребує врахування великої кількості різних факторів.

Використання «метеорологічного» підходу при оптимізації мережі постів спостереження істотно обмежується неоднорідністю і анізотропією полів концентрацій забруднюючих речовин (ЗР). Він також дуже дорогий, оскільки вимагає великого обсягу заздалегідь накопиченої інструментальними методами початкової інформації. Більш перспективними, принаймні в даний час, представляються методики, які використовують різні показники, що характеризують збиток (можливий або запобіжний) як критерій оптимізації. З урахуванням задач, що стоять перед мережею моніторингу, соціально-економічні показники, зокрема, збитки, виражені або в явній, або у відносній формі, є найбільш інформативними величинами, які необхідно використовувати при розробці і оптимізації мережі.

Існуючі підходи до оптимізації мережі постів моніторингу забруднення атмосфери, визначаючи одну єдину оптимальну конфігурацію, не передбачають можливості для оцінки ефективності цієї мережі при зміні різних факторів, що впливають на вибір такої конфігурації. Мінливість же цих чинників, особливо метеорологічних, накладає істотну невизначеність на процес прийняття рішень по розміщенню постів мережі. Тому в методиці оптимального розміщення мережі моніторингу забруднення атмосфери необхідно реалізувати можливості для порівняльної оцінки ефективності мережі при зміні чинників, що можуть впливати на її конфігурацію.

Представлені підходи не піднімають питань побудови мереж моніторингу з використанням маршрутних спостережень. Багато забезпечити також можливість вибору оптимального розміщення точок зупинки маршрутних постів і створення мереж гнучкої конфігурації.

Необхідно відзначити, що більшість представлених підходів для вирішення задачі оптимізації розміщення постів використовують різні методи визначення полів концентрацій ЗР. Відомі підходи, у тому числі й «метеорологічний», використовуючи інструментальні методи визначення концентрацій ЗР, жодним чином не можуть врахувати перспективу розвитку тих регіонів в яких вони використовуються. Найменш витратними можна визнати підходи, що використовують розрахункові методи для визначення полів концентрацій ЗР. Вони також дозволяють враховувати перспективу розвитку регіонів і достатньо широко використовуються при вирішенні задачі оптимізації розміщення мережі моніторингу забруднення атмосфери.

### 3. Оптимізація мережі моніторингу з використанням теорії ігор

На нашу думку, один з найбільш цікавих підходів до оптимізації розміщення постів мережі представлений в роботі [4]. Він базується на припущеннях з теорії ігор, де стратегіями гравця є різні варіанти розстановки постів мережі моніторингу (надалі стратегії розстановки), які характеризуються як конфігурацією, так і кількістю постів. В грі приймає участь «природа», яка визначає синоптичні і метеорологічні параметри навколишнього середовища (надалі метеоситуації).

При ухваленні рішень по попередженню забруднення атмосфери найбільш інформативною величиною є величина можливого збитку. Методи теорії ігор також пов'язані з поняттям кількісної оцінки збитків (втрат). Тому замість полів концентрацій окремих інгредієнтів, пропонується використовувати поля, що характеризують результуючий збиток від суми маючих істотний вплив на забруднення території домішок, з урахуванням соціально-економічних чинників.

В основу виграшу покладений коефіцієнт збитку, прямо пропорційний збитку, що наноситься ЗР, в якому враховано такі чинники як рівень забруднення, щільність населення, соціально-економічну цінність території. Кількість факторів, що враховуються, може бути збільшена. Для визначення виграшу гравця запропоновано алгоритм, що містить наступні етапи [4]:

1. Досліджувана територія розбивається на ділянки регулярною сіткою. Крок сітки вибирається з урахуванням необхідної деталізації розрахунків (передбачуваних мінімальних відстаней між постами мережі тощо). В квадратах, площа яких рівна площі квадрата сітки, а центри співпадають з вузлами сітки, визначається середня густина населення ( $H_{ij}$ ) і середній бал соціально-економічної цінності території ( $E_{ij}$ ). Показники  $E_{ij}$  можна обрати аналогічно показникам  $\sigma$  [5] або одержати шляхом експертних

оцінок. Подальші розрахунки проводяться для кожної метеоситуації ( $p$ ).

2. В вузлах сітки визначаються концентрації ( $q_{ijl}^p$ ) ЗР, які передбачається контролювати на постах. Найменш витратними способами отримання концентрацій у вузлах сітки можна вважати способи, що використовують розрахункові методи для визначення полів концентрацій ЗР. Вони також дозволяють враховувати перспективу розвитку регіонів і достатньо широко використовуються в екологічній практиці. Інструментальні способи є більш трудомісткими і коштовними, але вони і більш точні. Ці способи можуть використовуватися і спільно, наприклад, для коректування результатів моделювання, одержаних розрахунковим методом з використанням даних інструментальних спостережень. Вибір того або іншого способу визначення полів концентрацій, або їх сумісного використання, залежить від наявності достатньої інформації і можливостей сторони, що проводить це визначення.

3. Далі визначається коефіцієнт забрудненості  $Z_{ij}^p$  і коефіцієнт збитку  $K_{ij}^p$ , який характеризує ступінь збитку від забруднення в квадраті, центр якого співпадає з вузлом сітки:

$$Z_{ij}^p = \sum_{l=1}^t \delta_l \left( \frac{q_{ijl}^p}{ГДК_{ccl}} \right)^{C_l} \quad (1)$$

$$K_{ij}^p = Z_{ij}^p \left( 1 + \frac{H_{ij}}{H_{max}} + \frac{E_{ij}}{E_{max}} \right), \quad (2)$$

$$\delta_l = \begin{cases} 0, & q_{ijl}^p < 0,5 ГДК_{ccl} \\ 1, & q_{ijl}^p \geq 0,5 ГДК_{ccl} \end{cases} \quad (3)$$

де  $q_{ijl}^p$  – концентрація першої ЗР в  $p$ -ій метеоситуації у вузлі сітки ( $i,j$ );  $ГДК_{ccl}$  – середньодобова гранично допустима концентрація першої ЗР;  $C_l$  – безрозмірний коефіцієнт, що приводить рівень забруднення першою ЗР до рівня забруднення речовини третього класу небезпеки. Для речовин першого класу небезпеки  $C_1=1,7$ ; для другого – 1,3; для третього – 1,0; для четвертого – 0,9;  $t$  – загальне число домішок, що беруть участь в розрахунку;  $H_{ij}$  – середня густина населення (тис.чол./км<sup>2</sup>);  $H_{max}$  – максимальна густина населення на даній території;  $E_{ij}$  – безрозмірний показник соціально-економічної цінності ділянки території;  $E_{max}$  – максимальне значення показника соціально-економічної цінності на даній території.

Коефіцієнт  $K_{ij}^p$  характеризує відносний збиток від забруднення атмосфери певною кількістю  $t$  домішок з урахуванням населеності і соціально-економічної значущості території. Він представляє модифікований (з урахуванням специфіки побудови мережі моніторингу), достатньо відомий і використовуваний в оперативній роботі вираз для визначення інтегрального показника відносного збитку. В основу визначення  $K_{ij}^p$  покладений ІЗА (індекс забруднення атмосфери), що використовується при визначенні коефіцієнта забрудненості  $Z_{ij}^p$ .

4. Для кожної точки сітки в кожній метеоситуації визначається кількість домішок  $N_{ij}^p$ , які створюють коефіцієнт  $K_{ij}^p$

$$N_{ij}^p = \sum_{l=1}^t \delta_l \tag{4}$$

«Ціна» точки, що враховує як можливий збиток від забруднення, так і завантаження поста у разі установи його в цій точці, визначається за формулою:

$$\Pi_{ij}^p = K_{ij}^p \frac{N_{ij}^p}{t} \tag{5}$$

де  $K_{ij}^p$  – коефіцієнт збитку у вузлі (i, j) регулярної сітки в p-ій метеоситуації;  $N_{ij}^p$  – кількість домішок, що створюють збиток в точці (i, j) в p-ій метеоситуації.

На цих полях «цін» і розміщуються пости спостереження в точках, максимально співпадаючих з вузлами регулярної сітки. При розміщенні постів мережі можуть використовуватися два підходи: евристичний і формальний. В зв'язку зі складністю врахування великої кількості факторів, що впливають на розміщення поста (наявність електромережі, можливість доступу тощо), перевага віддається евристичному підходу. Формальний підхід може використовуватися як попередній етап, а також з його допомогою можна за умов мінімальної відстані між постами оцінити необхідну кількість постів для міста.

5. «Ціна» встановленого поста визначається за формулою:

$$\Pi_n^p = \frac{1}{s} \int_{s=s_{\text{ст}}} \Pi^p(s) ds, \tag{6}$$

де  $\Pi^p(s)$  – «ціна» елементарного майданчика в p-ій метеоситуації; s – площа території, що «представляється» постом;  $s_{\text{ст}}$  – площа, яка визначається перетином площ встановленого і передбачуваного постів.

Площа s приймається рівній площі кола з центром в точці установки поста і радіусом, встановлюваним користувачем методики.

Надалі в [4] на основі (1)-(6) запропоновано побудувати матрицю вигравів та матрицю ризиків, тобто вирішувати задачу оптимізації розміщення постів спостережень за допомогою теорії ігор.

#### 4. Удосконалена математична модель оптимізації мережі моніторингу забруднення атмосфери

Проте підхід, запропонований в роботі [4], має ряд суттєвих недоліків та обмежень. Далі запропоновано розглянути більш ефективну модель оптимізації мережі моніторингу забруднення атмосферного повітря, яка розраховує варіанти оптимального розміщення як стаціонарних, так і мобільних постів спостережень.

Розглянемо ряд конструктивних пропозицій щодо можливостей подолання недоліків моделі (1) – (6), врахування яких зрештою привело до побудови нової моделі, яка вже не потребує ігрової інтерпретації.

1. Виходячи з (3) можлива ситуація, коли точка, де всі концентрації ЗР наближаються  $0,5ГДК_{\text{сд}}$ , але менші за  $0,5ГДК_{\text{сд}}$ , взагалі не буде врахована в дослідженнях, проте точка, де концентрація лише однієї ЗР перевищує  $0,5ГДК_{\text{сд}}$ , а всі інші концентрації ЗР наближаються до нуля, уже може бути серед пріоритетних. Таким чином, від використання (3) треба відмовитись або принаймні враховувати пріоритетність ЗР, оскільки навіть незначні концентрації (менші від  $0,5ГДК_{\text{сд}}$ ) деяких ЗР за тривалий час мають значний негативний вплив на населення.

2. Не зовсім логічним є використання суми  $\frac{N_{ij}}{H_{\text{max}}} + \frac{E_{ij}}{E_{\text{max}}}$  в (2), оскільки в житлових районах згідно методики [5], за якою визначається  $E_{ij}$ , його значення буде пропорційним  $N_{ij}$ . Таким чином врахування густини населення відбувається двічі, при тому що для незаселених територій (лісів, промплощадок тощо) значення  $N_{ij}$  є рівним нулю, тобто суму  $\frac{N_{ij}}{H_{\text{max}}} + \frac{E_{ij}}{E_{\text{max}}}$  варто замінити лише значенням  $\frac{E_{ij}}{E_{\text{max}}}$ .

3. Підхід (4) використовує лише 8 основних напрямків вітру та 6 інтервалів швидкостей, тобто розглядається лише 48 метеоситуацій. При цьому не враховуються всі інші метеопараметри: стратифікація атмосфери, температура повітря, вологість, опади тощо. Таким чином, виникає необхідність врахування всіх перерахованих параметрів, а також інтерполяції проміжних напрямків вітру.

4. За наведеним описом, накладається лише одне обмеження на мінімальну відстань між постами, хоча при цьому відстань від встановлюваного поста до уже існуючих ПСЗ повинна безпосередньо впливати на пріоритетність його встановлення.

5. При обчисленні  $q_{ij}^p$  використовується застаріла методика ОНД-86, яку, згідно з дослідженнями, представленими в [6], рекомендується замінити на статистичну модифікацію моделей МАГАТЕ.

6. Загалом недоліки 1-5 практично повністю виключають використання даного підходу для вирішення задачі оптимізації розміщення стаціонарних ПСЗ.

Таким чином, щоб позбавитись від наведених недоліків та обмежень, замість формул (1)-(5) було запропоновано записати математичну модель для оптимізації розміщення ПСЗ в наступному вигляді:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} S_{ij} \rightarrow \max \tag{7}$$

де:

$$S_{ij} = \sum_{(k,p) \in (s-s_{\text{ст}})} K_{kp} \cdot \frac{d_{s_{\text{max}}} - d_{skp}}{d_{s_{\text{max}}}}, \tag{8}$$

$$K_{ij} = 3_{ij} \left( 1 + \frac{E_{ij}}{E_{\text{max}}} + \frac{d_{ij}}{d_{\text{max}}} \right), \tag{9}$$

$$3_{ij} = \sum_{l=1}^t \left( \frac{q_{ijl}}{ГДК_{\text{сд}l}} \right)^{C_l}, \tag{10}$$

за обмежень:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \leq N \quad (11)$$

$$\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \geq d_{\min}, \quad i = \overline{1, N}, k = \overline{1, N'} \quad (12)$$

де:  $m \times n$  – розмірність матриць після розбиття території міста на  $m \times n$  квадратів;  $a_{ij} = 1$ , якщо в точці  $(i, j)$  буде встановлено ПСЗ та  $a_{ij} = 0$  в інших випадках;  $d_{ij}$  - відстань між даною точкою  $(i, j)$  та найближчим ПСЗ та  $d_{\max}$  - максимальна відстань між будь-якою точкою в межах міста та найближчим ПСЗ;  $q_{ij}$  - концентрація 1-ої ЗР у вузлі сітки  $(i, j)$  розрахована за формулою (3) роботи [6];  $N$  – кількість нових ПСЗ, що буде встановлена;  $N'$  - число уже встановлених постів;  $d_{\min}$  - мінімальна відстань між ПСЗ;  $d_{\text{skp}}$  та  $d_{\text{smax}}$  - відстань від точки  $(i, j)$  до точки  $(k, p)$  та до границі області  $s$ ;  $S_{ij}$  - загальна «корисність» поста в точці  $(i, j)$ .

## 5. Висновки

1. На даний час переважна більшість наукових праць, в яких запропоновано певні підходи щодо модернізації існуючої системи моніторингу атмосфери України, носять або надто концептуальний характер, або стосуються інженерної складової даної проблеми, тобто розробки програмного та апаратного забезпечення вимірювального обладнання.

2. В результаті аналізу вітчизняної та закордонної літератури було встановлено, що розроблені на даний момент методи для вирішення задач оптимізації розміщення ПСЗ мають ряд недоліків: застарілі методики, обмежена кількість метеоситуацій та ряд інших обмежень.

3. З врахуванням сучасних вимог законодавства в галузі охорони навколишнього середовища здійснено розробку математичної оптимізаційної моделі для визначення розміщення ПСЗ (7)-(12), яка не має зазначених недоліків.

## Література

1. Про схвалення Концепції Державної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища (Розпорядження КМУ від 31 грудня 2004 р. № 992-р) [Електронний ресурс] / Режим доступу : \www/ URL: <http://www.uazakon.com/document/fpart55/idx55572.htm> – 16.05.2011 р. – Загол. з екрану.
2. Керівництво по контролю забруднення атмосфери : РД 52.04.186-89 / Державний комітет СРСР по гідрометеорології, Мінздоров'я СРСР. – Офіц. вид. - М. : 1991. – 687 с.
3. Дроздов, О.А., Шепелевский, А.П. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и её применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети [Текст] // Труды НИУ. – 1964. – №1.13. - С. 65-115.
4. Верлан, В. А. Оптимизация размещения сети постов мониторинга за загрязнением атмосферы в промышленном городе [Текст] : дис. ... канд. геогр. наук / В. А. Верлан. – О., 1999. – 167 с.
5. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды [Электронный ресурс] / Режим доступа : \www/ URL: <http://pravo.levonevsky.org/baza/soviet/sssr2999.htm> / – 16.05.2011 г. – Загл. с экрана.
6. Попов, О. О. Математичне та комп'ютерне моделювання техногенних навантажень на атмосферу міста від стаціонарних точкових джерел забруднення [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 / О.О. Попов ; [Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України] – К., 2010. – 20 с.