

## УДК 504.5:[621.43.064:519.87]

В. І. НОЧВАЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Науково-дослідний відділ № 215 «Інформатика навколишнього середовища», Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, вул. Академіка Глушкова, 42, Київ, Україна, 03187, тел. +38 (066) 758 84 57, ел. пошта nochvai@gmail.com, ORCID 0000-0003-0288-8675

## ФАКТОР ЕМІСІЇ ПЕРЕСУВНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВІТРЯ ВЕЛИКИХ МІСТ

**Мета.** Підвищення інтенсивності руху автотранспорту у великих містах потребує впровадження планів поліпшення якості атмосферного повітря згідно з «Порядком здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря». Для розробки і обґрунтування заходів зі зниження забруднення повітря та негативного впливу на довкілля й здоров'я населення в інформаційних системах ухвалення рішень необхідно обробляти великі масиви наявної різномірної інформації та використовувати математичні моделі прийняття рішень. Метою роботи є розробка математичної моделі прийняття рішень для оцінки ефективності планів управління якістю повітря в містах із високим рівнем викидів пересувних джерел забруднення. **Методика.** Для класу задач управління якістю повітря в містах застосовують методику побудови математичних моделей прийняття рішень в умовах невизначеності емісійних параметрів, зумовлених неповними даними щодо викидів автотранспорту та їх розподілу по території міста. Розглянуто структуру потоків даних в інформаційній системі відповідно до вимог сучасних систем підтримки прийняття екологічних рішень, під час чого керівні органи та особи мають можливість враховувати різні критерії соціального та економічного характеру. **Результати.** Аналіз даних державної статистики показав посилення впливу пересувних джерел на структуру забруднення повітря великих міст. Розглянуто інформаційні технології та оптимізаційні моделі, що дозволяють оперативно оцінювати вплив автотранспорту інтенсивності його руху на якість атмосферного повітря у містах та приймати стратегічні рішення щодо планування заходів її поліпшення. **Наукова новизна.** Запропоновано структуру інформаційної системи та модель прийняття рішень для управління якістю повітря на основі методів багатокритеріальної оптимізації емісійних параметрів за допомогою побудови матриці «джерело – рецептор» у сітковій області моделювання забруднення території міста викидами автотранспорту. **Практична значимість.** Модель може бути застосована на етапі проектування муніципальних систем екологічного моніторингу та під час вибору планів поліпшення якості атмосферного повітря в міських агломераціях.

**Ключові слова:** забруднення повітря автотранспортом; прийняття рішень; математичне моделювання; управління якістю повітря в містах

### Вступ

Для великих міст України характерні підвищені рівні забруднення повітря, зумовлені збільшенням кількості автотранспорту та, відповідно, інтенсивністю транспортних потоків.

Важливим класом екологічних задач є управління якістю навколишнього середовища, а для міського середовища особливо актуальні задачі управління якістю повітря, направлені на впровадження планів поліпшення якості атмосферного повітря згідно з «Порядком здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» [10]. Розв'язання таких задач потребує розробки комплексних інфор-

маційних систем обробки даних моніторингу стану довкілля, моделювання процесів надходження та поширення шкідливих речовин, обґрунтування заходів зі зниження забруднення та його впливу [12–16, 23]. Оскільки одна з функцій інформаційної системи для управління якістю повітря (ІСУЯП) – це забезпечення особи, що ухвалює рішення, необхідною інформацією та рекомендаціями щодо варіантів зниження небезпечних впливів забруднення на екосистеми та здоров'я населення, то для створення подібних систем доцільно розробляти відповідні моделі підтримки прийняття рішення [12–15, 17].

На першому етапі формування стратегії управління якістю повітря в регіоні, виявлення

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

загальних тенденцій необхідно оцінювати довготермінові середні рівні забруднення повітря, його просторові характеристики, проводити детальну інвентаризацію джерел викидів забруднювальних речовин (ЗР). На другому етапі слід вивчати небезпечні ситуації забруднення з використанням методів математичного та комп'ютерного моделювання [3, 4]. Лише після цього на основі розроблених імітаційних моделей можна проводити прогнозування небезпечних ситуацій забруднення та розробку рекомендацій щодо запобігання їм.

ІСУЯП повинна забезпечувати користувачеві доступ до моделей і даних у процесі прийняття рішень стосовно вибору варіантів зниження шкідливих впливів. Таким чином, за структурою інформаційна система повинна відповідати структурі сучасних систем підтримки прийняття рішень. Основним призначенням інформаційної системи є обслуговування осіб, що приймають рішення стосовно екологічної безпеки, нормування викидів ЗР та поліпшення якості міського довкілля, – органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування, суб'єкти систем екологічного моніторингу та їх територіальні органи.

### Мета

У цій роботі передбачено розробити модель прийняття рішень для задачі управління якістю повітря великих міст відносно оптимізації параметрів емісії автотранспорту в умовах неповних даних щодо викидів ЗР.

### Методика

Задачу прийняття рішень стосовно управління якістю повітря розглянуто як пошук оптимальних сценаріїв (планів) зниження антропогенного навантаження (автомобільних викидів) для досягнення встановлених нормативів якості повітря гранично допустима концентрація ((ГДК), допустимі ризики) на всій території міста за мінімальних витрат. При цьому в задачах прийняття комплексних управлінських рішень керівні органи та особи завжди мають можливість враховувати інші критерії соціального та економічного характеру.

Задачі, які розглядають у системах управління якістю повітря, поділимо на такі підзадачі:

- 1) задачі моніторингу шкідливих домішок та їхніх джерел;
- 2) задачі моделювання та прогнозування забруднення;
- 3) задачі визначення залежностей між рівнями забруднення та здоров'ям населення;
- 4) задачі планування заходів щодо зменшення ризику негативного впливу шкідливих речовин та інформування населення.

Для класу задач управління якістю повітря в містах застосовують методика побудови математичних моделей прийняття рішень в умовах невизначеності емісійних параметрів [2, 20], зумовлених неповними даними щодо викидів автотранспорту та їх розподілу по території міста.

Прийняття управлінських рішень на основі великих масивів даних сьогодні є пріоритетним напрямом упровадження інформаційних технологій. Оскільки для оцінки переважної більшості екологічних ситуацій важливо враховувати просторове положення або розвиток у просторі викидів, то суттєву роль у прийнятті обґрунтованих рішень відіграють засоби відображення, просторового аналізу та моделювання можливого розвитку ситуацій із використанням геоінформаційних систем (ГІС).

### Результати

*Аналіз статистичної інформації.* Значне скорочення загального обсягу викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря в Україні відбулося в 1985–2000 рр. внаслідок падіння економіки. Обсяг викидів стаціонарних джерел скоротився в 3 рази у 2000 порівняно з 1985 р. (на 8 203,6 тис. т) і становив 3 959,4 тис. т [1]. Від пересувних джерел обсяг викидів скоротився з 6 613,9 тис. т у 1985 до 1 949,2 тис. т у 2000 році. З того часу в масштабах країни ці показники, згідно з офіційною статистикою, мало змінювались, натомість проявилась тенденція зростання кількості автотранспорту, особливо легкових автомобілів.

Якщо з 1990 до 2005 року, за даними ДП «ДержавтотрансНДІпроект» [6], чисельність автомобілів коливалась навколо позначки

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3 млн, то вже у 2010 році вона перевищила 4 млн і досягла у 2015 році 4,6 млн одиниць, серед яких 3,5 млн легкових автомобілів [7, 18].

У наш час автомобільна транспортна система України налічує більше ніж 9,2 млн транспортних засобів, у тому числі [11]:

- 6,9 млн легкових автомобілів;
- $\approx 250$  тис. автобусів;
- $\approx 1,3$  млн вантажних автомобілів;
- понад 840 тис. одиниць мототранспорту.

Це зумовило посилення впливу пересувних джерел на структуру забруднення повітря великих міст. Наприклад, у м. Київ у 2018 році, за даними органів статистики, на 142,48 тис. т автомобільних викидів приходилось 29,2 тис. т викидів стаціонарних джерел (тобто лише 17 % від загального обсягу емісії ЗР у місті).

Статистичні дані про викиди стаціонарних та пересувних джерел забруднення повітря розміщено на сайтах органів державної статистики. Проте обсяги викидів забруднювальних речовин пересувними джерелами з 2016 року регіональні органи статистики не розраховують.

*Організація потоків даних підсистем (СППР–ГІС) в інформаційних системах управління якістю повітря.* Розглянемо структурну схему основних потоків даних, які треба забезпечити в ході проектування сучасних ІСУЯП. Згідно з вимогами до структури Систем підтримки прийняття рішень (СППР) [17], ІСУЯП повинна містити [9]: підсистему інтерфейсу користувача; підсистему керування базою даних; підсистему керування базою моделей та підсистему керування повідомленнями.

У разі застосування ризик-орієнтованого підходу до регулювання якості повітря доцільно виділити блок оцінки та аналізу ризиків [13]. Блок прийняття рішень повинен містити засоби багатокритеріальної оптимізації стосовно вибраних цільових функціоналів та вектора переваг користувача [2, 17]. Для аналізу просторових залежностей та візуалізації розподілів показників по території необхідна підсистема просторового моделювання, для неї ефективно використовувати засоби геоінформаційних систем. ГІС можна розглядати як частину графічного інтерфейсу користувача. На рис. 1 показа-

но структуру потоків інформації інтегрованої СППР–ГІС [9], що потрібно передбачити на етапі проектування систем.

Геоінформаційні системи здатні інтегрувати різноманітні просторові дані, необхідні в процесі прийняття рішень: просторові характеристики викидів ЗР, регіональні географічні, соціально-економічні, екологічні та медико-епідеміологічні характеристики. Поширеним є використання ГІС для відображення та аналізу полів забруднення на електронних картах [23]. Геоінформаційні системи забезпечують візуальне зображення багатовимірної екологічної інформації.

*Постановка задачі управління якістю повітря в містах.* Для пошуку оптимальних рішень необхідно провести оцінку затрат на реалізацію планів поліпшення якості повітря – сценаріїв ( $w$ ) зниження антропогенного навантаження від автомобільних викидів для досягнення екологічних стандартів  $c_{\text{доп}}$ .

Отже, запишемо постановку оптимізаційної задачі управління якістю міського повітря в сітковій області  $G^h: [L \times H]$  моделювання впливу викидів автотранспорту, розподілених по вузлах сітки  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), як вибір  $\{w, F\}$  оптимальних планів дій щодо зниження рівнів забруднення в нормативно-допустимих межах за встановленим критерієм оптимальності:

$$F = I(w(Q)) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i (Q_i^* - Q_i) \rightarrow \min;$$

де  $Q_i^*$  – початковий, а  $Q_i$  – досягнутий плановий рівень емісії ЗР від автотранспорту;  $\varepsilon_i$  – визначає вартість сценарію скорочення емісії (плану поліпшення якості повітря міської агломерації) при заданій кількості  $t$  деяких технологічних обмежень параметрів:

$$P_{\min}^t \leq P_i^t \leq P_{\max}^t;$$

та обмеження нерівностей на допустиму концентрацію  $j$ -ЗР,  $j = 1, 2, \dots, m$  в кожній  $i$ -зоні:  $i = 1, 2, \dots, n$  (комірках сіткової області  $G^h$ ):

$$Y_i^j(Q) \leq c_{\text{доп}}^j.$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

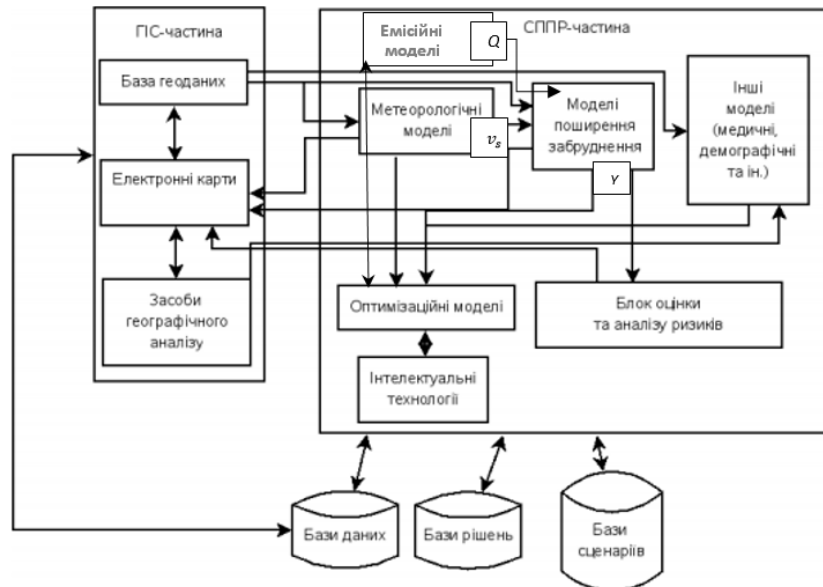


Рис. 1. Структура потоків даних підсистем СППР–ГІС ІСУЯП

Fig. 1. Data flows structure of subsystems of DSS-GIS-information system for air quality management

Рівні емісії ЗР є досить поширеними змінними прийняття рішень у задачах управління якістю повітря поряд з іншими, які обирають залежно від характеру цільових функцій [21]:

- відсоток скорочення викидів ЗР (за рахунок очищення або «не виробництва»);
- емісії, рівні викидів ЗР;
- рівень продуктивності підконтрольного джерела викидів;
- координати джерел є параметрами управління в задачах оптимального розміщення й міського планування.

У задачах управління якістю повітря можна виділити три типові підходи до вибору сценаріїв планів дій ( $w$ ) зниження викидів ЗР [14]:

1. *Зміна поведінки*, що знижує антропогенний тиск, який спричиняє викид ЗР.

Сюди належить регулювання інтенсивності руху в просторі (регулювання транспортних потоків, перекриття центральних вулиць тощо) і часі (уникнення ранкових заторів шляхом уведення гнучкого графіку робочого часу).

У багатьох містах світу набула поширення політика сталої мобільності, що зосереджується на двох основних напрямках [5, 8]: обмеження руху машин – вантажівок (виведення їх із міста) і легкових автомобілів; розвиток альтернативних способів мобільності – громадського тра-

нспорту, велосипедного руху та пішої ходьби.

2. *Структурні зміни*, що забезпечують однаковий рівень сервісів і продукції з меншими рівнями забруднень.

Тут можемо говорити про позитивні тенденції збільшення кількості електротранспорту. Міська влада може сприяти процесам шляхом використання електротранспорту для міських перевезень та в комунальному господарстві [8].

3. *Технологічні заходи на «кінці труби»*, що затримують забруднення до їх надходження в довкілля. Заходи цього типу охоплюють нормування та контроль вмісту токсичних речовин у вихлопних газах. У багатьох країнах світу викиди  $CO$ ,  $NOx$ , пилу, летких органічних сполук лімітують стандарти, що встановлюють норми гранично допустимих викидів.

Варіанти контролю викидів для мобільних джерел у моделі RAINS [19] розділено на такі категорії:

- зміни якості палива, наприклад, зменшення вмісту сірки. Зміни у специфікації палива можуть надати виробникам двигунів більшу гнучкість для використання нових технологій скорочень викидів;

- зміни в конструкції двигуна, які призводять до кращого контролю над процесами згоряння палива;

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– обробка димових газів після згоряння з використанням різних типів концепцій уловлювачів та каталізаторів для перетворення або захоплення викидів на виході з вихлопної труби;

– кращий огляд та обслуговування: тестування на відповідність під час експлуатації, сервісний огляд та обслуговування, бортові діагностичні системи.

*Математична модель прийняття рішень.* Побудова елементів матриці «джерело – рецептор» (МДР) є важливою проміжною ланкою в розв’язанні оптимізаційних задач мінімізації негативного впливу ЗР на стан повітряного басейну міста і в розв’язанні задач ідентифікації параметрів джерел ЗР за даними натурних спостережень. Моделі типу «джерело – рецептор» використовують [2, 22, 24] для моделювання залежностей та оцінювання чутливості критеріїв локальних концентрацій ЗР від характеристик джерел викидів для заданих метеоумов. Їх будують за допомогою чисельних моделей забруднення повітря, використовуючи техніку прямого й оберненого моделювання процесів поширення забруднень в атмосфері.

Особливо складні для моделювання процеси фотохімічної трансформації ЗР в атмосфері [16,18, 24] – у них беруть участь тисячі реакцій між сотнями органічних та неорганічних реагентів з утвореннями різних шкідливих сполук, зокрема тропосферного озону.

Для нелінійного випадку, що враховує нелінійні хімічні перетворення, МДР визначають частинними похідними  $\partial y / \partial x$  функції чутливості концентрації в  $k$ -зоні до зміни емісії  $i$ -джерела (комірки):  $m_{ik}^f = \frac{\partial c_k}{\partial Q_i}$ . Модель може

бути розрахована для  $j$ -ЗР за допомогою фотохімічної дифузійної моделі:

$$M : \Delta Q_i^j \rightarrow \Delta c_k^j;$$

$$МДР = m_{1k}^j, m_{2k}^j, \dots, m_{nk}^j.$$

Усі інші процеси, що супроводжують атмосферне перенесення, є лінійними: адвекція, дифузія, конвективне перемішування, сухе й вологе осадження та хімічні реакції першого порядку, із заданою швидкістю перетворень. У

цьому випадку залежність «джерело – рецептор» зводиться до простого виразу  $y/x$  і може бути розрахована за допомогою дифузійної моделі  $M: x \rightarrow y$ .

У такому наближенні розв’язок задачі ідентифікації емісійних параметрів на заданій сітковій області можна шукати за допомогою векторної релаксації, змінюючи покроково шукані значення пропорційно впливу джерела на концентрацію  $c_k \cong Y_k(Q)$ :

$$Q_i^* = Q_i - \lambda m_{ik};$$

де  $\lambda$  – величина кроку на ітерації,  $m_{ik}$  – відповідний компонент МДР.

Важливо оцінити ризики підвищеного рівня забруднення повітря, який виникає в регіоні під час погодних умов, що сприяють цьому. Метеорологічні параметри ( $v$ ) можуть бути обчислені в метеорологічних моделях із певним ступенем точності, їх вимірюють лише в конкретні часові періоди в окремих точках регіону. Для кожних атмосферних метеоумов  $v_s \in v$  можна оцінити ймовірність їх реалізації за певний період часу в регіоні.

Поставимо умову досягнення безпечної концентрації для всіх, навіть несприятливих, погодних умов. З метою мінімізації ризику шкідливого впливу на екологічно чутливі райони (дитячі садки, школи) доцільно застосовувати гарантовану оцінку критерію для усунення невизначеності метеоумов в песимістичному емісійному сценарію:

$$Y(Q) = \max_{v_s \in v, q \in \Omega} Y(Q, q, v_s);$$

де  $q$  – випадковий параметр, який характеризує неповноту даних емісії ЗР.

Розв’язок задачі багатокритеріальної оптимізації побудуємо на основі методу зовнішньої точки, для якого штрафні функції запишемо у вигляді:

$$F(Q) = f(Q) + H(Q);$$

$$f(Q) = I(Q) + J(Q);$$

або за наявності вектора переваг  $(p_1, p_2)$

$$f(Q) = p_1 I(Q) + p_2 J(Q);$$

$$H(Q) = \sum_k \alpha_k \delta_{jk}(Q);$$

$$\delta_{kj}(Q) = \frac{Y_k^j(Q)}{c_{kdon}^j},$$

$$\alpha_k(Q) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \delta_{kj}(Q) \leq 1 \\ \alpha, & \text{якщо } \delta_{kj}(Q) > 1 \end{cases},$$

$$\alpha_k^{(n)} = \max \left\{ 0; \alpha_k^{(n-1)} + r\delta_{kj} \right\},$$

де  $r > 0$  – деяка константа.

Ітераційний алгоритм обчислення оптимально знижених сіткових параметрів викидів за критеріями витрат  $I(w_i(Q))$  на реалізацію планів поліпшення якості повітря та інших цільових критеріїв  $J(w_i(Q))$ , що можуть бути додатково задані особами, що приймають рішення, має вигляд:

$$Q_i^{n+1} = \max \left\{ 0, Q_i^n + \lambda^I \nabla_{Q_i} I + \lambda^J \nabla_{Q_i} J + \sum_k \alpha \lambda \nabla_{Q_i} \delta_k(Q_1, \dots, Q_n) \right\}$$

Використовуючи елементи МДР, матимемо:

$$Q_i^{n+1} = \max \left\{ 0, Q_i^n + \lambda^I m_i^I + \lambda^J m_i^J + \sum_k \alpha \lambda m_{ik}^\delta \right\}$$

### Наукова новизна та практична значимість

У статті запропоновано структуру інформаційної системи та модель прийняття рішень для управління якістю повітря на основі методів багатокритеріальної оптимізації емісійних параметрів за допомогою побудови матриці «джерело – рецептор» у сітковій області моделювання забруднення території міста викидами автотранспорту.

Модель може бути застосована на етапі проектування муніципальних систем екологічного моніторингу та під час вибору планів поліпшення якості атмосферного повітря в міських агломераціях.

### Висновки

Аналіз даних державної статистики показав посилення впливу пересувних джерел на структуру забруднення повітря великих міст. Розглянуто інформаційні технології та оптимізаційні моделі, що дозволяють оперативно оцінювати вплив автотранспорту, інтенсивності його руху, на якість атмосферного повітря у містах та приймати стратегічні рішення щодо планування заходів її поліпшення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баришнікова, О. Є. Статистичне вивчення забруднення атмосферного повітря України антропогенними джерелами / О. Є. Баришнікова // Український соціум. – 2009. – № 1 (28). – С. 87–97.
2. Бейко, І. В. Моделювання та оптимізація параметрів емісійних процесів у повітряному басейні міста / І. В. Бейко, В. І. Ночвай // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія : Фізико-математичні науки: зб. наук. пр. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2008. – Вип. 1. – С. 25–32.
3. Беляев, Н. Н. Прогноз загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта с учетом химических трансформаций веществ и поглощения примеси поверхностью дороги / Н. Н. Беляев, Е. С. Славинская, Р. В. Кириченко // Збірник наукових праць НГУ. – 2018. – № 54. – С. 345–353.
4. Беляев, Н. Н. Численные модели для прогноза загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта / Н. Н. Беляев, Е. С. Славинская, Р. В. Кириченко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 25–32. doi: 10.15802/stp2016/90457
5. Вербицький, І. Як не вмерти від смогу: Київ має змінити транспортну політику [Електронний ресурс] / І. Вербицький // Українська урбаністична платформа MISTOSITE. – 2016. – Режим доступу: <https://clck.ru/MCCmb>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.11.2019.
6. Дослідження впливу на викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря структури парку колісних транспортних засобів України. Проміжний звіт ДП «ДержавотрансНДІпроект» з НДР. № Державного реєстру НДР – 0112U001736. – Київ, 2015. – 247 с.
7. Коломієць, С. В. Підвищення рівня екологічної безпеки автотранспортних підприємств : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.01 «Екологічна безпека» / Коломієць Сергій Валерійович – Київ, 2019. – 22 с.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

8. Миська мобільність в Києві: аналітична довідка та рекомендації [Електронний ресурс] // Центр екологічних ініціатив «Екодія». – 2016. – Режим доступу: <https://cutt.ly/wrJUDnv>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.11.2019.
9. Ночвай, В. І. Використання ГІС у задачах управління якістю повітря / В. І. Ночвай, Р. В. Криваковська, О. Ішук // Електроніка та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 2. – С. 154–163.
10. Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря [Електронний ресурс] : затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 827. – Режим доступу: <https://cutt.ly/MrJUNxh>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.11.2019.
11. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту [Електронний ресурс] // Міністерство інфраструктури України. – Режим доступу: <https://cutt.ly/WrJUMvb>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.11.2019.
12. A Framework for Integrated Assessment Modelling / Blond, N., Carnevale, C., Douros, J., Finzi, G., Guariso, G., Janssen, S., ... Volta, M. // Air Quality Integrated Assessment. – Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. – 2016. – P. 9–35. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33349-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33349-6_2)
13. An optimization-model-based interactive decision support system for regional energy management systems planning under uncertainty / Y. P. Cai, G. H. Huang, Q. G. Lin, X. H. Nie, Q. Tan // Expert Systems with Applications. – 2009. – Vol. 36. – Iss. 2. – P. 3470–3482. doi: 10.1016/j.eswa.2008.02.036
14. Cost-effective Control of Air Quality and Greenhouse Gases in Europe: Modeling and Policy Applications / Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., ... Winiwarter, W. // Environmental Modelling & Software. – 2011. – Vol. 26. – Iss. 12. – P. 1489–1501. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.07.012
15. Current air quality plans in Europe designed to support air quality management policies / A. Miranda, C. Silveira, J. Ferreira, A. Monteiro, D. Lopes, H. Relvas, ... P. Roebeling // Atmospheric Pollution Research. – 2015. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 434–443. doi: 10.5094/APR.2015.048
16. Hakami, A. Nonlinearity in atmospheric response: A direct sensitivity analysis approach / A. Hakami, M. T. Odman, A. G. Russell // Journal of Geophysical Research. – 2004. – Vol. 109. – Iss. D15303. – P. 1–12.
17. Makowski, M. Multi-objective Decision Support Including Sensitivity Analysis / M. Makowski // International Institute for Applied Systems Analysis. – Austria, 2001. – P. 1–22.
18. Mallet, V. A comprehensive study of ozone sensitivity with respect to emissions over Europe with a chemistry-transport model / V. Mallet, B. Sportisse // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol. 110. – Iss. D22302. – P. 1–15. doi: 10.1029/2005JD006234
19. Modeling Particulate Emissions in Europe. A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs / Z. Klimont, J. Cofala, I. Bertok, M. Amann, C. Heyes, F. Gyarfas // International Institute for Applied Systems Analysis. – 2016. – P. 1–167.
20. Nochvai, V. I. Decision Making Problem Under Uncertainties Relating to Air Quality Management / V. I. Nochvai // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2014. – P.105–109
21. Nochvai, V. I. Multi-objective optimization of emission parameters for air pollution models / V. I. Nochvai // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2011. – P. 705–709.
22. Seibert, P. Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model in backward mode / P. Seibert, A. Frank // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2004. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 51–63. doi: 10.5194/acp-4-51-2004
23. The use of a modelling system as a tool for air quality management: Annual high-resolution simulations and evaluation / P. Jiménez-Guerrero, O. Jorba, J. M. Baldasano, S. Gassó // Science of the total environment. – 2008. – Vol. 390. – Iss. 2–3. – P. 323–340. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.025
24. Using air quality modeling to study source-receptor relationships between nitrogen oxides emissions and ozone exposures over the United States / D. Q. Tong, N. Z. Muller, H. Kan, R. O. Mendelsohn // Environment International. – 2009. – Vol. 35. – Iss. 8. – P. 1109–1117. doi: 10.1016/j.envint.2009.06.008

В. И. НОЧВАЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Научно-исследовательский отдел № 215 «Информатика окружающей среды», Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, ул. Академика Глушкова, 42, Киев, Украина, 03187, тел. +38 (066) 758 84 57, эл. почта nochvai@gmail.com, ORCID 0000-0003-0288-8675

## ФАКТОР ЭМИССИИ ПЕРЕДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОЗДУХА БОЛЬШИХ ГОРОДОВ

**Цель.** Повышение интенсивности движения автотранспорта в крупных городах требует внедрения планов улучшения качества атмосферного воздуха согласно «Порядку осуществления государственного мониторинга в области охраны атмосферного воздуха». Для разработки и обоснования мероприятий по снижению загрязнения воздуха и негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения в информационных системах принятия решений необходимо обрабатывать большие массивы имеющейся разнородной информации и использовать математические модели принятия решений. Целью работы является разработка математической модели принятия решений для оценки эффективности планов управления качеством воздуха в городах с высоким уровнем выбросов передвижных источников загрязнения. **Методика.** Для класса задач управления качеством воздуха в городах применяют методику построения математических моделей принятия решений в условиях неопределенности эмиссионных параметров, обусловленных неполными данными о выбросах автотранспорта и их распределении по территории города. Рассмотрена структура потоков данных в информационной системе в соответствии с требованиями современных систем поддержки принятия экологических решений, во время чего управляющие органы и лица имеют возможность учитывать различные критерии социального и экономического характера. **Результаты.** Анализ данных государственной статистики показал усиление влияния передвижных источников на структуру загрязнения воздуха больших городов. Рассмотрены информационные технологии и оптимизационные модели, позволяющие оперативно оценивать влияние автотранспорта и интенсивности его движения на качество атмосферного воздуха в городах и принимать стратегические решения по планированию мероприятий его улучшения. **Научная новизна.** Предложена структура информационной системы и модель принятия решений для управления качеством воздуха на основе методов многокритериальной оптимизации эмиссионных параметров с помощью построения матрицы «источник – рецептор» в сетевой области моделирования загрязнения территории города выбросами автотранспорта. **Практическая значимость.** Модель может быть использована на этапе проектирования муниципальных систем экологического мониторинга и при выборе планов улучшения качества атмосферного воздуха в городских агломерациях.

*Ключевые слова:* загрязнение воздуха автотранспортом; принятие решений; математическое моделирование; управление качеством воздуха в городах

V. I. NOCHVAI<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Research Department No. 215 «Environmental Informatics», Institute of Problems of Mathematical Machines and Systems, National Academy of Sciences of Ukraine, Akademika Hlushkova St., 42, Kyiv, Ukraine, 03187, tel. +38 (066) 758 84 57, e-mail nochvai@gmail.com, ORCID 0000-0003-0288-8675

## MOBILE POLLUTION SOURCES EMISSION FACTORS IN THE TASKS OF AIR QUALITY MANAGEMENT OF LARGE CITIES

**Purpose.** Increasing the traffic intensity in large cities requires the implementation of plans to improve the air quality in accordance with the Procedure for the implementation of state monitoring in the field of atmospheric air protection. To develop and justify the measures to reduce air pollution and negative impact on the environment and public health in decision-making information systems, it is necessary to process large amounts of available heterogeneous information and use mathematical decision-making models. The paper proposes a mathematical decision-making model for evaluating the effectiveness of air quality management plans in cities with high emissions of mo-



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

bile pollution sources. **Methodology.** For air quality management problems in cities, a methodology is used for constructing mathematical models of decision-making under emission parameters uncertainty due to incomplete data on vehicles' emissions and their distribution over the city. The structure of data flows in the information system is considered in accordance with the requirements of modern environmental decision support systems, during which the management bodies have the opportunity to take into account different social and economic criteria. **Findings.** Analysis of national statistics showed an increase in the contribution of mobile sources to the structure of urban air pollution. Information technologies and optimization models are considered that make it possible to quickly assess the impact of vehicles and their traffic on atmospheric air quality in cities and make strategic decisions on planning measures to improve it. **Originality.** The structure of an information system and a decision-making model for air quality management are proposed based on the multi-criteria optimization of emission parameters using the construction of "source – receptor" matrix in the network area for modelling air pollution of a city's territory with motor vehicle emissions. **Practical value.** The model could be used at the stage of designing municipal environmental monitoring systems and developing plans for improving atmospheric air quality in urban agglomerations.

*Keywords:* vehicle air pollution; decision-making; mathematical modelling; air quality management in cities

## REFERENCES

1. Barishnikova, O. E. (2009). Statystychnie vyvchennia zabrudnennia atmosferneho povitria Ukrainy antropohennymy dzherelamy. *Ukrayinskiy sotsium*, 1(28), 87-97. (in Ukrainian)
2. Beyko, I. V. (2008). Modeliuvannia ta optymizatsiia parametriv emisiinykh protsesiv u povitrianomu baseini mista. *Matematichne ta kompyuterne modelyuvannya*, 1, 25-32. (in Ukrainian)
3. Belyaev, N. N. Slavinskaya, Ye. S., & Kirichenko, R. V. (2016). Prediction of air pollution in case of traffic emissions with account of admixture transfer and it's absorbtion by road. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 54, 345-353. (in Russian)
4. Biliaiev, M. M., Slavinska, O. S., & Kyrychenko, R. V. (2016). Numerical prediction models for air pollution by motor vehicle emissions. *Science and Transport Progress*, 6(66), 25-32. doi: 10.15802/stp2016/90457 (in Russian)
5. Verbytskyi, I. (2016). *Yak ne vmerty vid smohu: Kyiv maie zminyty transportnu polityku*. Ukrayinska urbanistichna platforma MISTOSITE. Retrieved from <https://clck.ru/MCCmb> (in Ukrainian)
6. Doslidzhennia vplyvu na vykydy shkidlyvykh rehovyn v atmosferne povitria struktury parku kolisnykh transportnykh zasobiv Ukrainy. (2015). Kyiv. (in Ukrainian)
7. Kolomiiets, S. V. (2019). *Pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky avtotransportnykh pidpriemstv*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Natsionalny aviatsiyny universytet, Kyiv. (in Ukrainian)
8. *Miska mobilnist v Kyievi: analitychna dovidka ta rekomendatsii*. (2016). Tsentr ekolohichnykh initsiatyv «Ekodiiia». Retrieved from <https://cutt.ly/wrJUDnv> (in Ukrainian)
9. Nochvai, V. I., Kryvakovska, R. V., & Ishchuk, O. (2012). Use of gis in the problems of air quality management. *Elektronika ta informatsiyni tekhnologii*, 2, 154-163. (in Ukrainian)
10. *Poriadok zdiisnennia derzhavnoho monitorynhu v haluzi okhorony atmosferneho povitria*. Retrieved from <https://cutt.ly/MrJUNxh> (in Ukrainian)
11. *Statystychni dani po haluzi avtomobilnoho transportu*. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. Retrieved from <https://cutt.ly/WrJUMvb> (in Ukrainian)
12. Blond, N., Carnevale, C., Douros, J., Finzi, G., Guariso, G., Janssen, S., ... & Volta, M. (2016). A Framework for Integrated Assessment Modelling. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 9-35. doi:10.1007/978-3-319-33349-6\_2 (in English)
13. Cai, Y. P., Huang, G. H., Lin, Q. G., Nie, X. H., & Tan, Q. (2009). An optimization-model-based interactive decision support system for regional energy management systems planning under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3470–3482. doi:10.1016/j.eswa.2008.02.036 (in English)
14. Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., ... & Winiwarter, W. (2011). Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1489-1501. doi:10.1016/j.envsoft.2011.07.012 (in English)
15. Miranda, A., Silveira, C., Ferreira, J., Monteiro, A., Lopes, D., Relvas, H., ... & Roebeling, P. (2015). Current air quality plans in Europe designed to support air quality management policies. *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 434-443. doi:10.5094/apr.2015.048 (in English)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

16. Hakami, A., Odman, M. T., & Russell, A. G. (2004). Nonlinearity in atmospheric response: A direct sensitivity analysis approach. *Journal of Geophysical Research*, 109(D15), 1-12. doi:10.1029/2003jd004502 (in English)
17. Makowski, M. (2001). *Multi-objective Decision Support Including Sensitivity Analysis*. International Institute for Applied Systems Analysis. (in English)
18. Mallet, V., & Sportisse, B. (2005). A comprehensive study of ozone sensitivity with respect to emissions over Europe with a chemistry-transport model. *Journal of Geophysical Research*, 110(D22), 1-15. doi:10.1029/2005jd006234 (in English)
19. Klimont, Z., Cofala, J., Bertok, I., Amann, M., Heyes, C., & Gyarmas, F. (2016). *Modeling Particulate Emissions in Europe. A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs*. International Institute for Applied Systems Analysis. (in English)
20. Nochvai, V. I. (2014). Decision Making Problem Under Uncertainties Relating to Air Quality Management. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 4(2), 105-109. (in English)
21. Nochvai, V. (2011). Multi-objective Optimization of Emission Parameters for Air Pollution Models. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 705-709. (in English)
22. Seibert, P., & Frank, A. (2004). Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model in backward mode. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(1), 51-63. doi:10.5194/acp-4-51-2004 (in English)
23. Jimenez-Guerrero, P., Jorba, O., Baldasano, J. M., & Gassy, S. (2008). The use of a modelling system as a tool for air quality management: Annual high-resolution simulations and evaluation. *Science of the total environment*, 390, 323-340. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.025 (in English)
24. Tong, D., Muller, N., Kan H., & Mendelsohn, R. (2009). Using air quality modeling to study source-receptor relationships between nitrogen oxides emissions and ozone exposures over the United States. *Environment International*, 35(8), 1109-1117. doi: 10.1016/j.envint.2009.06.008

Надійшла до редколегії: 19.08.2019

Прийнята до друку: 10.12.2019