
ЕКОЛОГІЯ ТА ЕКОЛОГІЧНА КІБЕРНЕТИКА

УДК 004.65+519.6

В. Б. Мокін, д-р техн. наук, проф.;**І. В. Варчук**, студ.**МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ
РЕЧОВИН У ПОВІТРІ МІСТА З ВИКОРИСТАННЯМ
ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Розглянуто відомі, найчастіше використовувані на практиці в Україні математичні моделі поширення забруднювальних речовин у повітрі міста від викидів як стаціонарних, так і рухомих джерел. Запропоновано комплекс методів та підходів для точнішого визначення необхідних для моделювання вхідних даних з використанням геоінформаційних технологій та методів просторового аналізу даних, що буде особливо ефективним за умов змінного рельєфу та малої кількості даних первинних спостережень.

Вступ

Розрахунки шкідливих викидів різних галузей промисловості України свідчать, що одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря у містах є автомобільний транспорт і його роль у цьому забрудненні стає дедалі більшою. Стабільне зростання кількості автомобільного транспорту призводить до перевантаження вулично-дорожньої мережі міст та загострює проблеми забруднення атмосферного повітря міських територій відпрацьованими газами автомобілів.

Шкідливий вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище має багато аспектів. Він проявляється у забрудненні атмосфери, водних об'єктів і земель, зміні хімічного складу ґрунтів і мікрофлори, утворенні виробничих відходів, шламів, порушенні ґрунтово-рослинного покриву тощо [1]. Тому питання моделювання поширення шкідливих речовин у повітрі та на території міста як від стаціонарних, так і від пересувних джерел забруднення є надзвичайно актуальними.

Існує багато математичних моделей, що дозволяють доволі точно описати процеси поширення забруднення за умови великої кількості достовірних даних спостережень. Проте варто зауважити, що збирання таких даних та ідентифікація математичних моделей за ними на практиці видається доволі складним завданням. Складнощі зумовлені, перш за все, рельєфом населених пунктів та малою кількістю даних первинних спостережень. Тому метою роботи є пошук методів та підходів для точнішого встановлення необхідних для моделювання поширення забруднювальних речовин у повітрі міст, з урахуванням рельєфу населених пунктів та малої кількості даних первинних спостережень, що дозволить визначати та прогнозувати значення забруднювальних речовин у повітрі міста, а також дасть змогу моделювати та прогнозувати забруднення будь-якої структурної одиниці міста (кварталу, мікрорайону) [2, 3]. Крім того, чітка картина моделювання та прогноз дозволить розробити та обґрунтувати заходи з мінімізації такого забруднювального впливу на найвразливіших ділянках міста: дитсадки, лікарні, освітні заклади, парки, об'єкти природно-заповідного фонду тощо.

**Математичні моделі та підходи до моделювання поширення забруднення повітря
у місті з використанням геоінформаційних технологій**

Кількість викидів автотранспорту залежить від комплексу факторів, основними з яких є стан дорожнього покриття, стан транспортного засобу, наявність регулювальних засобів, режими роботи транспортних засобів. Забруднювальні речовини, що утворюються під час роботи автотранспорту, поширюються через узбіччя доріг, тротуари, простори між зеленими насадженнями і будинками, розташованими вздовж вулиці всередину кварталів і дворів житлового району. Поширення ж викидів по придорожній території залежить також від багатьох чинників, таких як: наявність насаджень на цій території, провітрюваність придорожньої зони, наявність та поверховість архітектур-

них споруд у придорожній смузі, погодних умов, рельєфу тощо. Схематично модель поширення газів, що утворюються під час руху автотранспортних засобів у потоці на ділянці регульованої автомагістралі, показана на рис. 1.

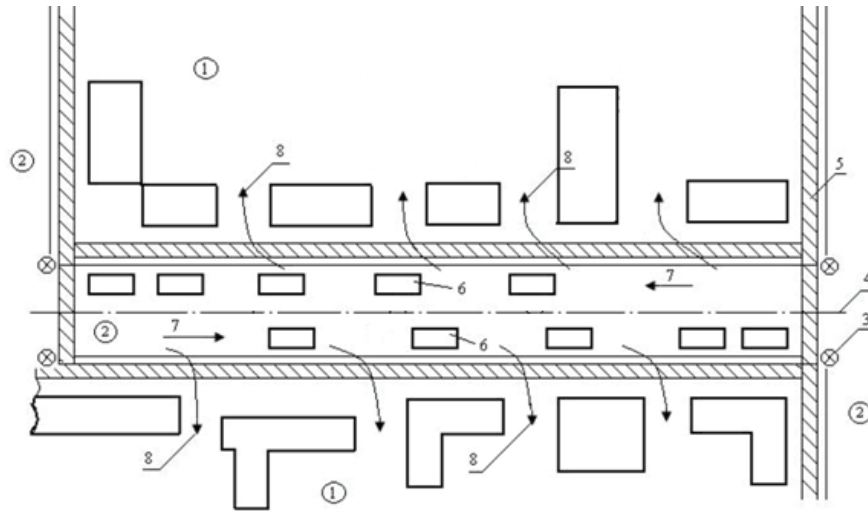


Рис. 1. Модель вулично-дорожньої мережі: 1 — квартал житлового району; 2 — транспортна магістраль; 3 — світлофор; 4 — середня лінія проїзної частини дороги; 5 — тротуар; 6 — автомобіль; 7 — напрямок руху автомобільного транспорту; 8 — напрямок руху потоків відпрацьованих газів автомобілів

Для математичного моделювання процесів поширення забруднювальних речовин в атмосфері і побудови полів забруднень на малих і середніх відстанях застосовують найрізноманітніші моделі. Однією з найпоширеніших в Україні є модель на основі розсіювання за формулами Гауса, що передбачає оцінювання поширення забруднення вздовж координатних осей, а також використовує теорію масопереносу (так звані «градієнтні» або К-моделі), яка базується на розв'язанні рівняння турбулентної дифузії. Саме за цією моделлю здійснюється розрахунок поширення забруднювальних речовин в атмосферному повітрі за методикою «ОНД-86», відповідно до якої розраховуються і нормуються усі стаціонарні джерела викидів, зокрема в Україні та Російській Федерації [1].

Основна модель для випадку постійної швидкості вітру і відсутності хімічної трансформації описується таким математичним виразом [10]:

$$C = \frac{M}{2\pi u \delta_y \delta_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\delta_y^2}\right) \left(\exp\left(-\frac{(z-P)^2}{\delta_z^2}\right) + k \exp\left(-\frac{(z+P)^2}{\delta_z^2}\right) \right), \quad (1)$$

де C — концентрація забруднювальної речовини, $\text{г}/\text{м}^3$; M — потужність викиду, $\text{г}/\text{с}$; u — швидкість вітру на висоті H , $\text{м}/\text{с}$; δ_y, δ_z — параметри горизонтальної і вертикальної дисперсій, м ; y — відстань від середньої лінії шлейфа, м ; z — висота над поверхнею землі, м ; k — коефіцієнт відбивання ($0 \leq k \leq 1$); P — кінцева висота підняття шлейфа, м .

Варто зауважити, що проведення моделювання за виразом (1) вимагає великого обсягу даних про метеорологічні умови.

Теоретичні закономірності розповсюдження і просторово-часового розподілу забруднювальних домішок в атмосфері визначаються шляхом розв'язання рівняння атмосферної дифузії [10]:

$$\frac{dq}{dt} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{dq}{dx_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{dq}{dx_i} K_i \frac{dq}{dx_i} - \alpha q, \quad (2)$$

де q — домішка, що розраховується; x_i — координати домішки, які, як правило, позначаються трійкою координат x, y, z ; K_i — складова середньої швидкості пересування домішки і коефіцієнта обміну, що відноситься до напрямків осі x_i ($i = \overline{1, 3}$); α — коефіцієнт, що визначає зміну концентрації за рахунок атмосферного метаболізму (перетворення домішки).

Рівняння (2) у частинних похідних є математичною формалізацією закону збереження потоку речовин і дає універсальний опис закономірностей розподілу домішок в атмосфері. Застосування

такого підходу до математичного моделювання турбулентної дифузії, який часто називають К-теорією [4], спільно з обґрунтованим спрощенням і емпіричними уточненнями, що лежать в основі нормативного документа з розрахунку розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі «ОНД-86» [5], знайшло відображення в математичній моделі для холодних викидів [5]:

$$C_m = \frac{AMFm'\eta}{H^{7/3}}, \quad (3)$$

де C_m — сумарна концентрація шкідливої домішки; A — коефіцієнт температурної стратифікації атмосфери; M — маса забруднювальної речовини, що викидається в атмосферу за одиницю часу, г/с; у випадку автотранспортного потоку — маса речовини, що викидається групою автомобілів, що утворюють потік; F — безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість гравітаційного осідання твердих часток (пилу) в атмосферному повітрі на підстилаючу поверхню (розраховуючи розсіювання в атмосфері сажі в результаті роботи транспортних двигунів, рекомендується приймати значення параметра $F=1$); m' — безрозмірний коефіцієнт; η — безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості; H — висота неорганізованого джерела викиду над рівнем землі.

За виразом (3) розраховуються значення найбільшої сумарної концентрації шкідливих домішок, що встановлюється на деякій відстані від місця викиду від транспортних засобів, як від близько розташованих один до одного джерел на окремих ділянках магістралі.

Також досить широке розповсюдження отримала CFD-модель (Computational Fluid Dynamics — з англ.: обчислювальна гідродинаміка), що дозволяє швидко та точно здійснювати моделювання потоків рідин та газодинамічних, хімічних, теплових та інших потоків і процесів.

Таким чином, для розрахунків за моделями (1)—(3) необхідні, перш за все, такі вхідні дані: u , P , δ_y , δ_z , x_i , H , K , A , η . При цьому, зрозуміло, що, наприклад, значення змінних u , P , u , x_i залежать від координат точки та певних факторів (забудова, рельєф місцевості та ін.). А, отже, для підвищення точності розрахунку варто було б використовувати не фіксоване значення цих параметрів, як це часто робиться одразу для усього міста чи регіону, для якого проводиться розрахунок, а їх інтерпольоване значення, отримане з використанням геоінформаційних технологій.

Методи просторового аналізу для визначення вхідних для моделювання даних з використанням геоінформаційних технологій

Визначати параметри просторових об'єктів можна з використанням багатьох методів просторового аналізу, зокрема: одновимірного аналізу, двовимірного аналізу, геостатистичного аналізу та ін. [2, 3, 6—9].

Для визначення вхідних для моделювання даних з використанням геоінформаційних технологій пропонується використовувати такі види просторового аналізу:

- інтерполяція (заокруглення, лінійна інтерполяція, кубічна інтерполяція, апроксимація найближчим сусіднім, метод обернено квадратичної дистанції, метод найближчого сусідства (полігон Тиссена-Вороного, поліноміальний тренд);
- геостатистичний аналіз (точковий кригінг, нелінійний кригінг);
- побудова цифрової моделі місцевості та кореляційний і регресійний аналізи значень параметра, які залежать від значень висоти рельєфу місцевості у відповідній точці.

Використовуючи ці види просторового аналізу даних, можна обчислювати концентрацію та коефіцієнти дисперсії за відповідними формулами, визначати швидкість вітру на потрібному рівні, класи стійкості (турбулентності) атмосфери за конкретних умов, коефіцієнти турбулентності на заданій відстані.

Параметр u можна визначати за методом апроксимації найближчим сусіднім, що розраховується із найближчих чотирьох значень на основі орієнтовних координат поширення хмари забруднювальної речовини.

Параметр H рекомендується визначати із цифрової моделі місцевості, інтерпольованій для рівнинної місцевості за GRID-алгоритмом (з використанням прямокутників на регулярній мережі точок), а для гірської — за TIN-алгоритмом (з використанням трикутників на нерегулярній мережі точок).

Параметри u_i , x_i можна визначити за таким методом інтерполяції, як округлення (інтерполяції до ближчого сусіднього), за якого значення поточного місцезнаходження округлюються до цілих і таким чином визначають найближче значення в точці з цілими координатами, використовуючи геоінформаційну систему міста з нанесеними координатами джерела викиду та рельєфу місцевості та наявної забудови.

Геостатистичний аналіз можна використати для визначення оптимального значення параметра P , аналізуючи рельєф місцевості, висоту поширення викиду для кожного окремого місця (джерела) викиду за тих чи інших метеорологічних умов. Геостатистичний аналіз, як відомо, дає можливість дослідження структури дискретних наборів просторово-координованих даних, побудови на їх основі безперервних поверхонь і, таким чином, оцінювання (прогнозу) значень змінної в точках (комірках растра), в яких вона не спостерігалася та оцінювання похибки цієї побудови з використанням статистичних методів. В основі методів побудови (моделювання) безперервних поверхонь на основі дискретних (точкових) масивів просторово-координованих даних лежать процедури просторової інтерполяції. При цьому використовуються як стохастичні, так і детерміністичні підходи [7—9]. На рис. 2 відображено результат геостатистичного аналізу.

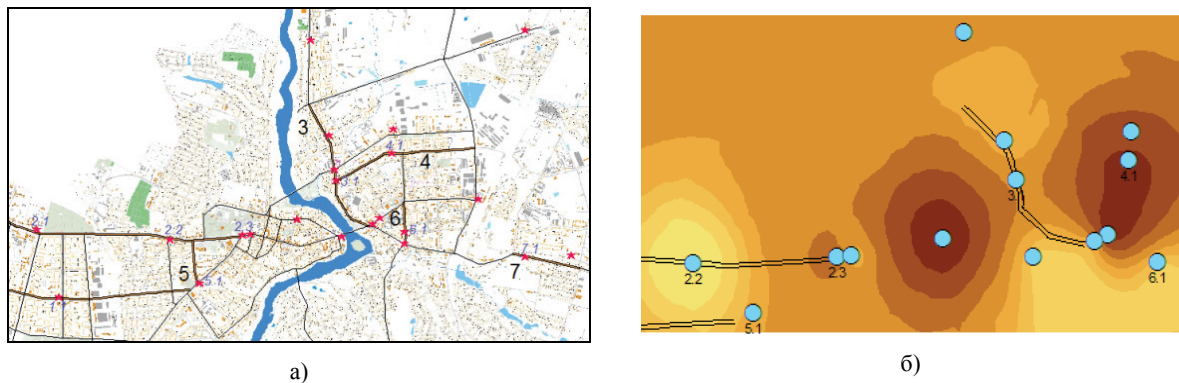


Рис. 2. Результат геостатистичного аналізу: а) карта вулиць та місць спостережень міської санепідемслужби м. Вінниця; б) поверхня, побудована за методом диз'юнктивного кригінгу за даними моніторингу концентрації оксиду вуглецю у м. Вінниця за 2006 рік

Використовуючи зазначені види аналізу даних, можна обчислювати концентрацію та коефіцієнти дисперсії за відповідними формулами, визначати швидкість вітру на потрібному рівні, класи стійкості (турбулентності) атмосфери за конкретних умов, коефіцієнти турбулентності на заданій відстані. Інтерпольовані значення дозволяють сформувати поверхню просторового явища (атмосферного тиску, вологості, температури, концентрації різних речовин у різних середовищах та ін.) на різній висоті на рівнем землі.

Двовимірний аналіз доцільно застосовувати, коли модель складається із більше ніж однієї змінної. Як приклад, можна навести профіль доріг з пунктами спостереження за станом атмосферного повітря. Вздовж дороги на пунктах спостереження нанесено радіуси зон поширення забруднення. До уваги взято й те, що зони можуть перетинатись між собою (рис. 3).



Рис. 3. Профіль доріг із зонами поширення забруднення

Для моделювання розроблено технологію, що дозволяє швидко та якісно провести дослідження. Особливістю цієї технології є побудова зони поширення викидів автотранспорту з урахуванням матриці висот перехресть, перегонів вулиць чи пунктів спостереження за інтенсивністю автотранспортного потоку. Врахування матриці висот необхідне тому, що дорожня мережа є неоднорідною, а кожен перегон чи пункт спостереження має свої особливості. Ця технологія дозволяє проводити математичні розрахунки змінних за методами, удосконаленими за типовими моделями, та уточнений розрахунок із застосуванням ГІС-технологій. Окремі параметри за певних умов задаються як постійні значення, тобто константи, окремі параметри встановлюються інтегральним методом, а окремі — одновимірним чи двовимірним просторовим аналізом або з використанням геостатистичного аналізу (залежність від метеофакторів та ін.).

Для порівняння забруднення атмосферного повітря у різних контрольних точках створено матрицю висот. Вона відображає значення відносної висоти об'єктів. За занесеними у матрицю даними побудовано карту зон поширення забруднення, в залежності від рельєфу місцевості та відносних висот точок спостереження, що показана на рис. 4.

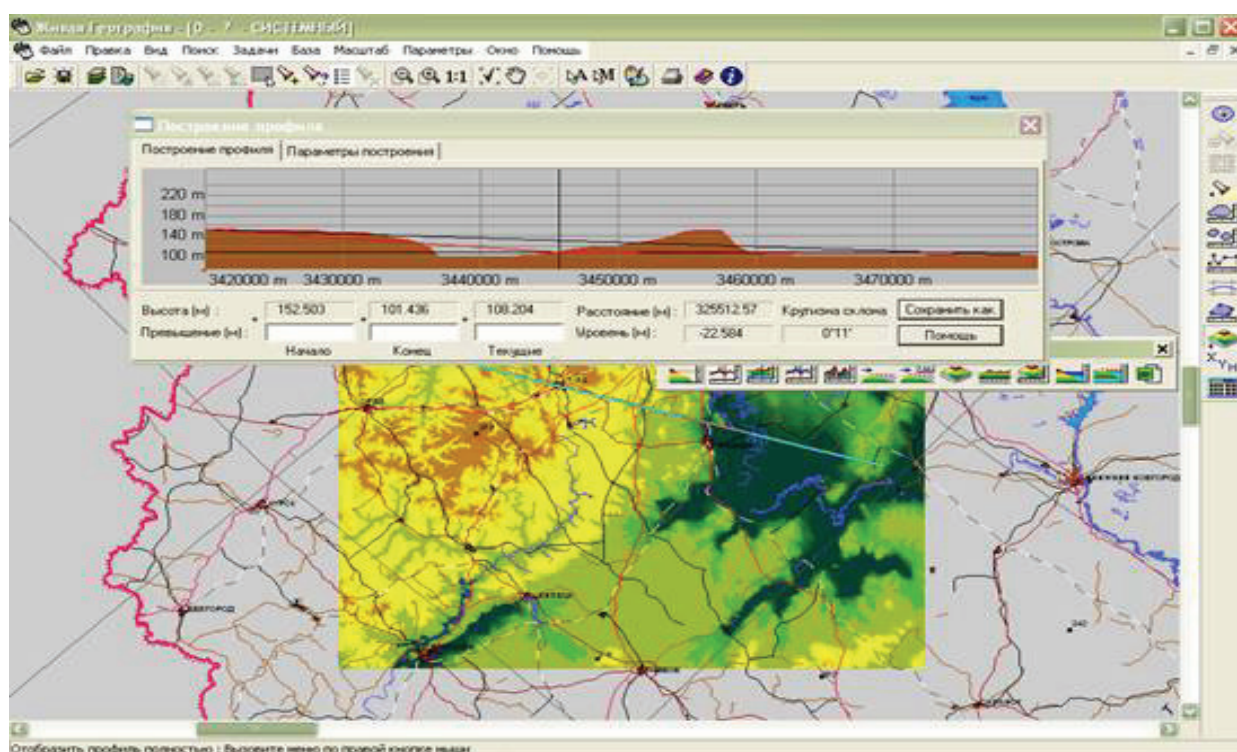


Рис. 4. Фрагмент прикладу карти зон поширення викидів в атмосферне повітря (ГІС «Карта» КБ «Панорама», РФ)

На рис. 4 інтенсивнішим кольором помічені ділянки дороги з вищим рівнем забруднення. Також мають місце ділянки, де відбувається сумація забруднювальних потоків на ділянках дорожньої мережі. Крім того, можна оцінити вплив викидів на населення та на вразливі природні об'єкти чи локальні екосистеми. Зони поширення викидів автотранспорту часто збігаються саме із закладами громадського користування (навчальними закладами, лікарнями, торговими центрами тощо) та об'єктами природно-заповідного фонду.

Висновки

Розглянуто відомі, найчастіше використовувані на практиці в Україні математичні моделі поширення забруднювальних речовин у повітрі міста від викидів як стаціонарних, так і рухомих джерел. Запропоновано комплекс методів та підходів для точнішого визначення необхідних для моделювання вхідних даних з використанням геоінформаційних технологій та методів просторового аналізу даних, що буде особливо ефективним за умов змінного рельєфу та малої кількості даних первинних спостережень.

Запропоновані методи просторового аналізу та підходи дозволять підвищити точність моделювання та визначити заходи, які необхідно вжити першочергово для зниження негативного впливу викидів на населення та на вразливі природні об'єкти чи локальні екосистеми міст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Екологія та автомобільний транспорт / [Гутаревич Ю. Ф., Меркалов Д. В., Говорун А. Г. та ін.]. — К. : Арістей, 2006. — 292 с.
2. Мокін В. Б. Інформаційна технологія інтегрування математичних моделей у геоінформаційні системи моніторингу поверхневих вод : моногр. / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, М. П. Боцула. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 150 с.
3. Мокін В. Б. Інформаційна технологія проектування систем обробки даних спостережень якості вод : моногр. / В. Б. Мокін, А. Р. Ящолт, М. П. Боцула. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 203 с.
4. The wind field model. [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.indic-airviro>.
5. Общесоюзный нормативный документ Госкомгидромета СССР (ОНД-86). Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. — Л. : Гидрометеоздат, 1987. — 93 с.
6. Методи, моделі та інформаційні технології оцінювання станів складних об'єктів: моногр. / [Є. І. Кучеренко, В. Є. Кучеренко, І. С. Глушенкова, І. С. Творошенко]. — Х. : ХНАМГ, ХНУРЕ, 2012. — 276 с.
7. Аналіз впливу капітального ремонту доріг на стан атмосферного повітря з використанням геоінформаційних технологій на прикладі м. Вінниці / [В. Б. Мокін, Ю. С. Семчук, О. П. Сорочан, О. В. Риженко] // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. праць. — К., 2011. — С. 5—15.
8. Світличний О. О. Основи геоінформатики : навч. посіб. / О. О. Світличний, С. В. Плотницький ; за заг. ред. О. О. Світличного. — Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. — 295 с.
9. Мокін В. Б. Удосконалення методу ординарного кригінгу геостатистичного аналізу для моделювання якості вод у річці з урахуванням її звивистості систем / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, Ю. С. Семчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 4. — С. 46—52.
10. Основи математичного моделювання в екології : навч. посіб. з грифом МОН України / [А. В. Гладкий, І. В. Сергієнко, В. В. Скопечкий, Ю. А. Гладка]. — К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка». — 2009. — 240 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки

Стаття надійшла до редакції 29.10.2013

Рекомендована до друку 30.10.2013

Мокін Віталій Борисович — завідувач кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки;

Варчук Ілона Вячеславівна — студентка Інституту екології та екологічної кібернетики.
Вінницький національний технічний університет, Вінниця