

Є.М.Кіптенко, Т.В.Козленко

ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНІВ ВИСОКОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У МІСТАХ УКРАЇНИ

Розроблено методику короткотермінового прогнозування рівнів забруднення повітря. Оцінено вплив різних чинників на забруднення повітря. Виявлено закономірності формування високого рівня забруднення повітря шкідливими домішками. З використанням методу покрокової множинної регресії на перетворених предикторах отримані прогностичні рівняння.

Вступ

Своєчасний і достовірний прогноз високих рівнів забруднення атмосферного повітря є важливою складовою природоохоронних заходів. В УкрНДГМІ за останні 10-15 років розроблено методики розрахунку значного забруднення атмосфери в більшості обласних промислових центрів.

Результати аналізу справджуваності прогнозів засвідчили значну ефективність прогнозування високих рівнів наявності домішок. Виникла необхідність в узагальненні інформації та визначенні ролі емісійних та метеорологічних факторів у формуванні рівнів забруднення різної величини. В основу покладено статистичний метод прогнозування.

Використання статистичного методу прогнозу забруднення повітря дає реальну можливість короткотермінового зниження викидів у періоди несприятливих метеорологічних умов (НМУ) і, таким чином, не перевищувати санітарно-гігієнічні нормативи якості повітря у цей період.

Розроблено і здійснюється оперативне короткотермінове (із завчасністю 24-36 год) прогнозування рівнів забруднення повітря для десяти найбільших міст України (Києва, Харкова, Дніпропетровська, Донецька, Одеси, Запоріжжя, Кривого Рогу, Маріуполя, Луганська, Черкас), які мають значне антропогенне навантаження. Прогнозуються рівні основних забруднюючих речовин – пилу, діоксиду азоту, діоксиду сірки, оксиду вуглецю і специфічних (фенолу, аміаку, сірководню та ін.) в залежності від характеру промисловості.

Прогностичні схеми розробляються для зимового і літнього періодів, які використовуються і для перехідних сезонів, так як впродовж цих сезонів спостерігається значна мінливість метеорологічного режиму.

Основа статистичного методу прогнозу забруднення повітря

Основу методу складають дані про забруднення атмосферного повітря і метеорологічні характеристики досліджуваної території. Використовуються різні методи статистичного аналізу фактичних даних за забрудненням: метод множинної регресії, дискримінантний аналіз, метод розпізнавання образів, метод головних компонент та ін. [1-8].

Перевагою статистичних методів прогнозу є те, що в їх основі лежать дані систематичних спостережень за забрудненням атмосфери на стаціонарних постах впродовж ряду років. Вони дозволяють врахувати особливості забруднення повітря конкретного міста (провести аналіз метеорологічних умов у періоди високого рівня забруднення, побудувати “розу” забруднення, відібрати статистично значущі чинники при різних метеорологічних умовах, провести районування території міста за рівнями забруднення повітря і побудувати прогностичну схему на основі реальної картини із залученням фізичних і теоретичних уявлень про розповсюдження домішок.

Однак, статистичні методи потребують великого об’єму вихідної інформації, щоб результати були репрезентативними, а також для забезпечення значущості крайніх градацій метеорологічних величин при перетворенні предикторів, які часто не забезпечені достатньою кількістю спостережень. Чим довший ряд (3-5 років), тим ймовірніше що виключаються впливи окремих погодних факторів або випадкових викидів і чіткіше виявляються основні закономірності забруднення повітря, які характерні для даної території.

Прогнозування забруднення повітря атмосфери базується на наступних факторах формування визначеного рівня забруднення: емісійних факторів (параметрів джерел викидів), топографічних (ландшафтних) особливостей території, метеорологічних умов. Техногенні і топографічні фактори постійні або такі, які змінюються повільно. Метеорологічні процеси, навпаки, характеризуються значною мінливістю і сприяють розповсюдженню домішок від джерел викидів. Забруднення атмосфери під впливом метеорологічних умов може змінюватися одночасно на всій території міста. Воно характеризується

узагальненими (інтегральними) показниками, які розраховуються за матеріалами фактичних спостережень.

У даній роботі в якості показника забруднення (параметра Q) використовується середня по місту концентрація домішки, нормована на середню за сезон концентрацію [3, 4]. Найбільш важливою є група високого рівня забруднення повітря, при прогнозуванні якої необхідне зниження викидів. Групи забруднення визначаються згідно табл.1.

Таблиця 1

Групи рівнів забруднення атмосфери у місті [4, 5]

Номер групи	Градації параметра Q	Характеристика рівнів забруднення	Середня повторюваність, %
I	$> 1,4$	Відносно високе	10
II	$0,8 - 1,3$	Підвищене	40
III	$\leq 0,7$	Низьке	50

Градації уточнюються у кожному конкретному місті. Якщо статистичний розподіл параметра Q відрізняється від того, що надається у табл.1, границі між групами можуть бути іншими. Наприклад, у містах Дніпропетровськ, Маріуполь і Одеса в зв'язку зі зниженням фону забруднення повітря були змінені градації прогнозу і оцінки групи рівнів забруднення параметра Q (табл.2).

Таблиця 2

Групи рівнів забруднення повітря атмосфери у містах Дніпропетровськ, Одеса, Маріуполь (1992-1998 рр.)

Номер групи	Градація параметра Q	Характеристика рівнів забруднення повітря	Середня повторюваність, %
I	$\geq 1,2$	Відносно високе	10
II	$0,8 - 1,1$	Підвищене	40
III	$\leq 0,7$	Низьке	50

При уточненні градацій зберігається приблизне дотримання зазначеної повторюваності: 10% для I групи, 40% для II групи, 50% для III групи.

У першій групі, повторюваність якої становить 10%, відокремлюється група екстремально високого забруднення, що має повторюваність 2%. Наприклад, у м. Дніпродзержинськ за 1992-1994 рр. влітку нарівні з високими рівнями забруднення повітря ($Q \geq 1,4$) спостерігалися випадки екстремально високого забруднення ($Q \geq 2,0$), повторюваність яких по пилу, діоксиду сірки, діоксиду азоту та оксиду вуглецю значно перевищувала 2%.

Метеорологічні фактори забруднення повітря

Вплив метеорологічних факторів на забруднення повітря має складний характер. Зв'язки поміж рівнями концентрацій і метеорологічними факторами в ряді міст схожі. Це пояснюється тим, що спостерігається деяка схожість у структурі викидів і використанні при виконанні розробок характеристик узагальненої міської складової забруднення повітря. Але, при нестандартній структурі викидів, особливо у тих випадках, коли головні джерела викидів розташовані в одній частині міста або за його межами, характер зв'язку між концентраціями і метеорологічними чинниками має свої особливості.

Одним із важливих етапів побудови статистичної прогностичної схеми є формування складу предикторів. При розробці прогностичної схеми для кожного міста використовувалося біля 270-300 векторів - предикторів. З багатьох можливих предикторів необхідно відібрати з одного боку ті, які найбільше відображають фізичні закономірності розповсюдження домішок в атмосфері, а з другого - предиктори повинні бути такими, що прогнозуються і доступні в оперативній практиці. В якості предикторів в результаті попереднього аналізу були відібрані найбільш характерні метеорологічні чинники: напрямок і швидкість вітру, синоптичні умови, інерційний чинник.

Напрямок і швидкість вітру. Вплив цього фактору найбільш чітко виявляється тоді, коли джерела викидів розташовані за містом, або в навітреній чи підвітреній його частині. Коли джерела розповсюджені рівномірно по території міста, вплив напрямку вітру на формування забруднення часто не просліджується. Виявлення цього впливу на розподіл шкідливих домішок ускладнюється розвитком місцевої циркуляції атмосфери, місцевими особливостями та ін. [5, 6]. Наприклад, у м. Черкаси головні промислові підприємства розташовані на південному сході від житлової забудови, тому напрямок вітру з півдня та сходу грає

важливе значення у формуванні рівня забруднення повітря. У місті 80% випадків високого рівня забруднення ($Q \geq 1,5$) діоксидом азоту за період 1989-1991 рр. припадає на південний, південно-східний напрямок вітру. У м. Донецьк концентрації фенолу ($Q \geq 1,7$) у повітрі збільшуються взимку при вітрах східного та північно-східного напрямках (рис.1).

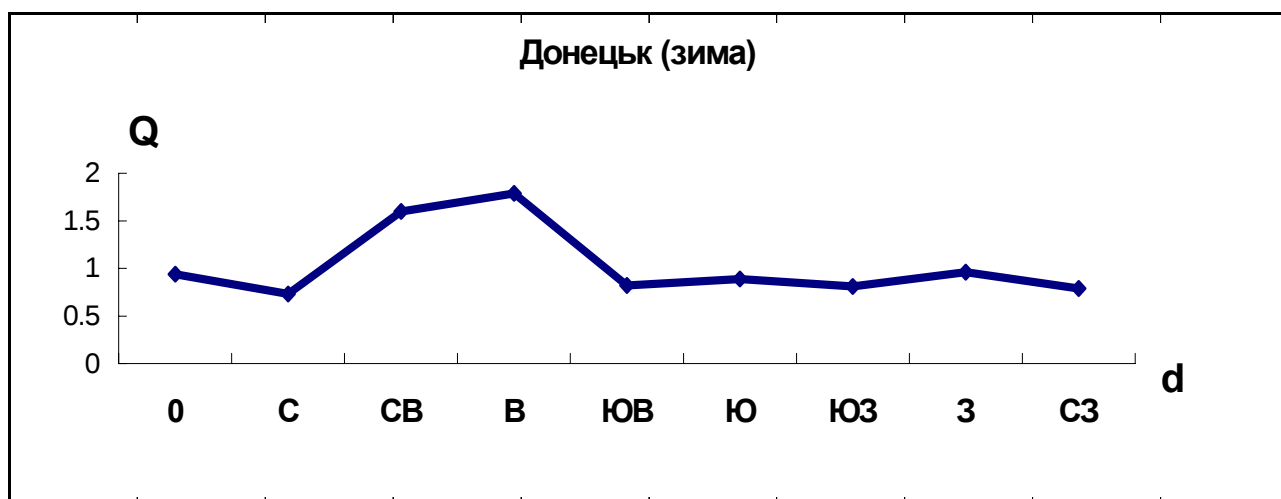


Рис.1. Графік залежності нормованих значень концентрацій фенолу Q від напрямку вітру d взимку у м. Донецьку (1992-1996 рр.)

В умовах міста, де розташовані високі і низькі джерела викидів, спостерігається наявність двох максимумів забруднення повітря в залежності від швидкості вітру на рівні флюгера: при штилі і слабких вітрах (0-2 м/с) та при швидкості вітру біля 4-6 м/с. В окремих містах відмічається ще один максимум забруднення повітря при швидкості вітру 8-9 м/с (при наявності піднесеної інверсії). Наприклад, у містах Донецьк, Дніпропетровськ високе забруднення повітря спостерігається при штилі, швидкості вітру 2-5 м/с і 8-9 м/с, у м. Маріуполь найбільша повторюваність високого рівня забруднення при штилі, швидкості вітру 3-5 м/с і 9-12 м/с. У Черкасах повторюваність штилів складає близько 50%, тому тут біля 90% випадків високого забруднення повітря спостерігається при штилях і швидкості вітру 4 м/с, в Одесі – при швидкості 1-5 м/с. Для низьких джерел викидів формування високих рівнів забруднення повітря спостерігається при слабких вітрах за рахунок накопичення домішок у приземному шарі. Другий максимум забруднення утворюється викидами ТЕЦ і інших підприємств, які мають високі труби.

Синоптичні умови. Синоптична ситуація являє собою складну комплексну характеристику, яка відображає основні риси метеорологічних та аерологічних умов в усьому граничному шарі атмосфери. Загальна закономірність полягає у наступному: підвищене забруднення атмосфери спостерігається при антициклональному баричному полі і в теплих секторах циклонів. Вплив синоптичних умов у формуванні визначеного рівня забруднення неоднаковий у різних містах. Наприклад, у Кривому Розі та Донецьку відзначена вище тенденція чітко проглядається, в інших вона завуальована (Запоріжжя). У середньому ж по вивчених містах Донецького і Придніпровського промислових районів чітко виражена тенденція поступового зменшення концентрацій при переході від полів високого тиску до полів низького тиску. Таким чином, підтверджується висновок про макрометеорологічну обумовленість рівня концентрацій.

Приклад типізації синоптичних процесів влітку для м. Дніпропетровська (1992-1994 рр.) наведений у табл.3, де синоптичні ситуації подані у вигляді індексів.

Таблиця 3

Синоптичні ситуації, які використані для м. Дніпропетровська

Індекс синоптичної ситуації	Тип синоптичної ситуації
1	Теплий сектор циклону
2	Сідловина
3	Північно-східна, східна, південно-східна периферія антициклону при вітрі ≤ 3 м/с
4	Північно-східна, східна, південно-східна периферія антициклону при вітрі ≥ 3 м/с
5	Західна, південно-західна, північно-західна периферія антициклону при вітрі ≤ 3 м/с
6	Західна, південно-західна, північно-західна периферія антициклону при вітрі ≥ 3 м/с
7	Малоградієнтне поле підвищеного тиску
8	Улоговина, передня частина улоговини, теплий фронт
9	Фронт оклюзії
10	Малоградієнтне поле зниженого тиску
11	Тил циклону (холодний фронт)

Інерційний фактор. Ступінь забруднення повітря у містах пов'язаний з інерційним фактором. Забруднення повітря Q у місті залежить від його значення Q' у попередній день. Якщо у попередній день значення Q' (або іншого показника забруднення повітря у місті) велике, то і в поточний день забруднення повітря, як правило, буде підвищене, якщо синоптичні умови не змінюються. Інша картина спостерігається, коли значення узагальненого по місту показника забруднення повітря мале ($Q' \leq 0.7$). У даному випадку у поточні дні частіше всього відмічається зниження забруднення повітря, якщо не відмічаються залпові викиди, у тому числі і в такій несприятливій ситуації як застій повітря. Коефіцієнт кореляції поміж значеннями показника Q у сусідні дні складає 0.6-0.8. Наприклад, у теплий період року коефіцієнт кореляції поміж значеннями узагальненого по місту показника забруднення Q у сусідні дні складає у Харкові по діоксиду азоту - 0.78, у Кривому Розі по фенолу - 0.67, у Черкасах по сірковуглецю - 0.65.

Вплив інерційного фактору встановлений майже для всіх міст, де проводились дослідження.

Деякі з метеорологічних факторів, які впливають на концентрацію домішок у повітрі, можуть бути невідомі. Але при урахуванні усталеного рівня забруднення повітря вони в якійсь мірі враховуються автоматично.

Таким чином, в якості предикторів використовувались такі чинники: v_0 - швидкість вітру на висоті флюгера, м/с; d_0 - напрямок вітру у румбах на висоті флюгера; Δt - різниця температури поміж добовими температурами; C - тип синоптичної ситуації; Q' - попереднє нормоване забруднення повітря.

Крім вищезгаданих предикторів при наявності даних радіозондування можна використовувати й інші:

v_{925} - швидкість вітру на рівні ізобаричної поверхні АТ – 925, м/с;

v_H - середня швидкість вітру у шарі перемішування;

Δt - різниця температур поміж рівнями землі та АТ₉₂₅, °С;

H - висота шару термодинамічного перемішування, м.

Метод статистичного аналізу, що застосовується при прогнозуванні забруднення атмосфери

Розробка схем прогнозу забруднення повітря атмосфери проводиться для передбачення показника забруднення повітря окремими домішками і їх сукупністю, які найбільш характерні для даного міста.

Найбільш прийнятним для практичного використання в оперативній роботі є метод множинної лінійної регресії з використанням предикторів і предиктанта в їх природному вигляді. При його використанні предиктант (у нашому випадку параметр Q) в залежності від метеорологічних характеристик і попереднього значення Q' розраховується за формулою:

$$Q = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_nx_n, \quad (1)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ - предиктори (метеорологічні характеристики і попереднє забруднення повітря), $B_1, B_2, \dots, B_n$ - параметри рівняння регресії (вагові коефіцієнти), B_0 - вільний член рівняння.

Побудова багатомірної регресійної моделі базується на розрахунках кореляційної матриці, яка являє собою парні коефіцієнти кореляції, як між предикторами, так і між предиктором і предиктантом.

Для реалізації статистичної моделі шляхом множинної лінійної регресії для ряду міст України розроблені прогностичні схеми. Вони розроблені окремо для кожного міста шляхом врахування особливостей розповсюдження забруднюючих речовин і метеорологічних умов формування рівнів забруднення атмосферного повітря даної території.

Аналіз виконувався у кроковий спосіб, що дозволив відібрати інформативні предиктори і розрахувати рівняння регресії та його статистичні оцінки на кожному кроці. Результатом є можливість з декількох рівнянь вибрати найкраще.

По розрахованих коефіцієнтах множинної лінійної регресії, критеріях Фішера і Стюдента визначалася необхідність включення у рівняння нових чинників. Побудова рівняння закінчується на тому кроці, після якого підвищення множинного коефіцієнту кореляції стає незначущим.

Для прикладу нижче наведені рівняння регресії для розрахунку пилу та діоксиду азоту (NO_2) і коефіцієнт множинної кореляції (R) для Дніпропетровська:

зима

$$Q_{\text{пил}} = 0,37T + 0,30d_{03} + 0,55d_{15} + 0,48C + 0,73Q' - 1,39; \quad (R = 0,72)$$

$$Q_{\text{NO}_2} = 0,69T + 0,57v_{03} + 0,57d_{15} + 0,83Q' - 1,63; \quad (R = 0,69)$$

літо

$$Q_{\text{пил}} = 0,39T + 0,36d_{03} + 0,45v_{03} + 0,55C + 0,62Q' - 1,39; \quad (R = 0,75)$$

$$Q_{\text{NO}_2} = 0,70d_{03} + 0,61C + 0,85Q' - 1,16. \quad (R = 0,80)$$

На основі цих рівнянь по відомих значеннях предикторів (прогностичних або вимірюваних) легко розраховується очікуване значення показника забруднення повітря у місті.

Недоліком цієї схеми є те, що враховується тільки лінійна кореляція. Реальні зв'язки мають більш складний характер. Предиктор може включатися у схему множинної лінійної регресії тільки у тому випадку, якщо між ним і предиктантом є значуща лінійна кореляція.

Позитивні наслідки дає перетворення пре дикторів [2], що дає підставу розробляти прогностичну схему з використанням методу множинної лінійної регресії. Цей метод зручний тим, що дозволяє включити безпосередньо у схему не тільки кількісні, а й якісні, або векторні показники (тип синоптичного процесу, напрямок вітру тощо).

Наприклад, у табл.4 наведені середні значення нормованої концентрації пилу при різних градаціях температури повітря (T_0) і при різних синоптичних ситуаціях (С), які представлені у виді індексів від 1 до 11 для м. Дніпропетровськ.

Таблиця 4

Середні значення нормованої концентрації при різних градаціях метеорологічних параметрів. Дніпропетровськ. Літо (1992-1994 рр.)

T_0	5,1 - 10,0	10,1 - 15,0	15,1 - 20,0	20,1 - 25,0
Пил	0,50	0,87	1,06	1,24

С	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пил	2,00	1,13	1,02	0,75	1,28	1,51	1,10	0,85	0,40	0,97	0,56

Висновки

Результати випробувань методик з прогнозування високих рівнів забруднення повітря показали, що найбільш прийнятним для практичного використання в оперативній роботі є метод множинної регресії з урахуванням нелінійності зв'язків. Цей метод органічно об'єднує всі характеристики, тобто він дозволяє врахувати особливості забруднення конкретного міста і побудувати прогностичну схему на основі фактичних даних систематичних спостережень.

Загальна справджуваність рівнів прогнозів забруднення повітря пріоритетними домішками в середньому складає близько 80%. Справджуваність групи високого рівня забруднення по окремим домішкам складає біля 90%, при повторюваності даного явища 10-15%,

критерій Багрова у більшості випадків перевищує 0,3; для високого рівня забруднення він має значення 0,7-1,0.

* *

Разработана методика краткосрочного прогнозирования уровней загрязнения воздуха. Определено влияние различных факторов на загрязнение. Выявлены закономерности формирования высокого уровня загрязнения вредными примесями. С помощью метода пошаговой множественной регрессии на преобразованных предикторах рассчитаны прогностические уравнения.

* *

1. Берлянд М.Е. Исследование атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / Современные исследования Главной Геофизической обсерватории. Т. 2. -СПб.: Гидрометеиздат, 2001 - С. 117-145.

2. Елекоева Л.И. Прогноз загрязнения атмосферы с использованием преобразованных предикторов // Тр. ГГО. -1987. - Вып.511. - С. 124-130.

3. Методические указания по прогнозированию загрязнения воздуха в городах с учетом метеорологических условий. РД 52.04.78-86 - М.: Гидрометеиздат, 1986. - 59с.

4. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха. РД 52.04.306-92 СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 103 с.

5. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. - Л: Гидрометеиздат, 1991. – 223 с.

6. Сонькин Л.Р., Николаев В.Д. Синоптический анализ и прогноз загрязнения атмосферы // Метеорология и гидрология. - 1993. - №5. - С. 19 - 20.

7. Сонькин Л.Р., Ивлева Т.П., Волкодаева М.В. Схема прогноза распределения концентраций примесей в воздухе на территории города с использованием метода разложения по естественным ортогональным функциям // Тр. ГГО. - 1998. - Вып.549. - С.87-97.

8. Сонькин Л.Р. и др. Прогнозирование высоких уровней загрязнения воздуха в городах и промышленных регионах / Современные исследования Главной Геофизической обсерватории. - СПб.: Гидрометеиздат, 2001. - С. 195-204.