УДК 550+502.175

М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛІВ ВМІСТУ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРІ МЕГАПОЛІСІВ (НА ПРИКЛАДІ м. КИЄВА)

Проведено порівняльний аналіз моделей розподілу вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва з використанням максимально правдоподібних оцінок параметрів: нормального, логнормального, композиційного з нормально розподіленими локальними складовими, композиційного з логнормальними локальними складовими. Доведено, що останні дві моделі дають змогу виконувати стійкі оцінки площ перевищення критичних меж вмісту шкідливих речовин. Згідно з оцінками, стан забруднення атмосферного повітря м. Києва з 2001 по 2010 р. суттєво погіршився, особливо за вмістом пилу, діоксиду сірки, діоксиду азоту.

Ключові слова: атмосферне повітря, вміст забруднювальних речовин, композиційно-нормальна модель, композиційно-логнормальна модель, гранично допустима концентрація (ГДК).

Вступ. Щорічно в повітряний басейн сучасного мегаполісу з викидами промислових підприємств і транспорту надходять сотні, а іноді й тисячі тонн різних шкідливих речовин. Залежно від складу сполук промислових викидів, їх періодичності, висоти, на якій вони здійснюються, а також від кліматичних умов, що визначають перенесення, розсіювання викидів, і багатьох інших факторів формується рівень забруднення атмосфери [6]. Для поліпшення якості моніторингу повітря слід вчасно й об'єктивно оцінювати поточний стан та прогнозувати зміни у забрудненні навколишнього середовища. Необхідною складовою є адекватна модель розподілу вмісту шкідливих речовин в атмосферному повітрі мегаполіса. У цій статті розглянуто можливості оптимального моделювання розподілів вмісту зазначених речовин в атмосферному повітрі м. Києва.

Забруднення атмосферного повітря визначає формування якості всіх компонентів навколишнього середовища, а також стан здоров'я населення. Проте порушення нормального складу повітряного середовища може впливати не лише на здоров'я, а й на рівень захворюваності організму. Так, забруднення атмосфери Києва деякими сполуками набуває незворотного характеру. [4].

За даними Екологічного паспорту м. Києва [1], "однією з найважливіших екологічних проблем м. Києва є забруднення атмосферного повітря". Серед основних джерел забруднення атмосфери – пересувні джерела, з яких перше місце займає автотранспорт, а також підприємства енергетики (теплоелектроцентралі), будіндустрії, машинобудівної, хіміко-фармацевтичної, харчової промисловості. Зокрема, у 2010 р. загальна кількість викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел м. Києва становила 265,3 тис. т [5]. У забруднення атмосферного повітря м. Києва стаціонарними джерелами найбільший внесок роблять підприємства енергетики (ТЕЦ-5, ТЕЦ-6 АК "Київенерго", філіал "Завод «Енергія» Київенерго", ПрАТ "Екостандарт").

Мета цього дослідження – визначення засобів підвищення ефективності моделювання розподілів вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва. Найпоширенішими моделями розподілу забруднювальних речовин є класична гаусівська (нормальний закон) і логнормальна (логарифмічно нормальний закон). За результатами досліджень 2001–2010 рр. автори дійшли висновку, що обидві моделі не є універсальними, оскільки далеко не завжди адекватно описують розподіли результатів вимірювань. Вдале застосування моделей композиційного розподілу (композиційно-нормальної та композиційно-логнормальної) під час вивчення розподілів вмісту важких металів у поверхневих водах Полтавської, Чернігівської областей [3] дало можливість застосувати ці моделі для розв'язування задачі та порівняти їх з класичними нормальним і логнормальним законами розподілів.

Щільність гаусівського (нормального) розподілу одновимірного показника ξ має вигляд

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right),$$

де $m = \mathbf{M}\xi$ – математичне сподівання ξ; $\sigma = \sqrt{D\xi}$ – середнє квадратичне відхилення. Функція розподілу

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mathbf{M}\xi}{\sigma} \right),$$

де $\Phi(x)$ – функція (0, 1)-нормального розподілу $N(0, 1)$ (нормального розподілу з нульовим мате-

© М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа

матичним сподіванням і одиничною дисперсією) [2].

Щільність логнормального розподілу має вигляд

$$p(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\delta x}\exp\left[-\dfrac{(\ln x-\mu)^2}{2\delta^2}\right], & \text{якщо } x>0,\\ 0, & \text{якщо } x\le 0,\end{cases}$$

де $\mu = \mathbf{M}\ln\xi$, $\delta^2 = \mathbf{D}\ln\xi$. Функція розподілу

$$F(x)=\begin{cases}0, & \text{якщо } x\le 0,\\ \Phi\left(\dfrac{\ln x-\mu}{\delta}\right), & \text{якщо } x>0.\end{cases}$$

Для автоматизації вибору закону розподілу використано критерій нормальності за альтернативи логнормального закону, запропонований М. Жуковим [2]. Нульова гіпотеза H_0 полягає у тому, що задана величина ξ як вибірка незалежних спостережень $x_1, x_2, \ldots, x_n$ має нормальний розподіл. Альтернативою H_1 слугує логнормальний закон розподілу. Ймовірність гіпотези H_0 оцінюємо у вигляді

$$\breve{p}_0 = 1/(1+s^n),$$

де

$$s=\frac{\breve{\sigma}}{\breve{\delta}\exp(\breve{\mu})},\quad \breve{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2},$$
$$\breve{\delta}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\ln x_i-\breve{\mu})^2},\quad \breve{\mu}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln x_i. \qquad (1)$$

Оцінка ймовірності альтернативи H_1 дорівнює $\breve{p}_1 = 1-\breve{p}_0$. Якщо $\breve{p}_0 > 0{,}5$, то приймаємо нульову гіпотезу (нормальний закон), а якщо $\breve{p}_0 < 0{,}5$, то вона відхиляється на користь альтернативи (логнормального закону). Для оцінки параметрів у формулах (1) використано метод максимуму правдоподібності [2].

Модель композиційного розподілу ґрунтується на такому уявленні. Значення показника в кожній точці об'єкта дослідження (тобто забруднення повітря) являє собою величину, розподілом якої керують випадкові фактори локального характеру. Відповідно, варіація локального розподілу є відносно невеликою і здебільшого може бути оцінена за розрахунком. Локальні фактори складаються з метрологічного (випадкова похибка вимірювання) та природного (локальна неоднорідність об'єкта дослідження). Вказаній моделі відповідає така структура поля вимірюваних значень показника забруднення (з прив'язкою до координат у горизонтальній площині):

$$\eta(x, y) = m(x, y) + \Delta(x, y) + \varphi(x, y),$$

де $m(x, y)$ – функція математичного сподівання, що ототожнюється з регіональною складовою поля; $\varphi(x, y)$ – випадкове поле локальної складової; $\Delta(x, y)$ – узята із знаком похибка виміру. Поєднавши стохастичні складові, одержимо:

$$\eta(x, y) = m(x, y) + \gamma(x, y),$$

де $\gamma(x, y)$ – стохастична (локальна), $m(x, y)$ – трендова (регіональна) складові.

Отже, маємо таку структуру спостереження:

$$x_i = m_i + \gamma_i, \quad i = 1 \ldots n,$$

де m_i – математичне сподівання вмісту забруднювальної речовини в i-й точці; γ_i – узяте із знаком відхилення локальної складової від математичного сподівання розподілу в цій самій точці; n – кількість спостережень.

У загальному випадку

$$\mathbf{M}x_i = m_i,\ \sigma\gamma_i = f(m_i), \quad i = 1 \ldots n,$$

де $f(m_i)$ – функція, що описує залежність локального середнього квадратичного відхилення від математичного сподівання. Модель композиції локальних розподілів в цій задачі будуємо з таких уявлень.

Позначимо S_i площу частини об'єкта досліджень, яку представляє у загальній виборці спостереження x_i; ξ – вміст забруднювача у довільно узятій точці об'єкта; ξ_i – його вміст у довільно узятій точці площі S_i. Виходячи з геометричного означення ймовірності, маємо такий вираз функції розподілу вмісту:

$$F(x) = \mathbf{P}\{\xi < x\} = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i \mathbf{P}\{\xi_i < x\} = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i F_i(x),$$

де $\alpha_i = S_i / S$; $S = \sum_{i=1}^{n} S_i$; $F_i(x)$ – функція локального розподілу на площі S_i. Відповідно, щільність розподілу

$$p(x) = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i p_i(x),$$

де $p_i(x)$ – щільність локального розподілу на площі S_i. У разі рівномірного розташування точок вимірювань на площі досліджень

$$F(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}F_i(x), \quad p(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}p_i(x).$$

Проведений аналіз показав, що в обговорюваній задачі цілком задовільною є лінійна апроксимація функції $f(m)$:

$$f(m) = Am + B.$$

Оцінки коефіцієнтів A та B можуть бути одержані в ході спеціальних експериментів або методом максимуму правдоподібності.

У цьому дослідженні проведено порівняльний аналіз моделей розподілу з використанням максимально правдоподібних оцінок параметрів:

© М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа

нормального, логнормального, композиційного з нормальними локальними складовими, композиційного з логнормальними локальними складовими.

Оцінки коефіцієнтів A та B обчислено за методом максимуму правдоподібності. Для моделі Gaussian mixture логарифм функції правдоподібності має вигляд

$$L_{\text{nor}}(A,B)=\ln\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{Ax_i+B}\exp\left(-\frac{x_i^2}{2(Ax_i+B)^2}\right)\right)-\ln n.$$

Для суми логнормальних складових дисперсія логарифма вмісту на площі S_i

$$\mathbf{D}\ln\xi_i=\ln\left(\frac{(Am_i+B)^2}{m_i^2}+1\right)=\ln\left(\left(A+\frac{B}{m_i}\right)^2+1\right),$$

отже, логарифм функції правдоподібності

$$L_{\log n}(A,B)=\ln\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i\sqrt{\ln((A+B/x_i)^2+1)}}\times\right.$$
$$\left.\times\exp\left(-\frac{(\ln x_i)^2}{2\ln\left((A+B/x_i)^2+1\right)}\right)\right)-\ln n.$$

Розподіли вмісту шкідливих речовин в атмосферному повітря м. Києва за період 2001–2010 р. змодельвано за даними Центральної геофізичної обсерваторії МНС України (ЦГО МНС) [7]. Виконано порівняльний аналіз моделей з використанням максимально правдоподібних оцінок параметрів: нормального, логнормального, композиційного з нормально розподіленими локальними складовими, композиційного з логнормальними локальними складовими.

Автори розробили і тестували програмний модуль для автоматизованої побудови непараметричної та параметричних оцінок щільностей розподілів за допомогою обговорюваних моделей, а також для візуалізації щільностей розподілу разом з автоматичним вибором закону розподілу кожної компоненти.

Побудовано непараметричну оцінку щільності розподілу та її максимально правдоподібну нормальну апроксимацію (рис. 1, *а*), максимально правдоподібну логнормальну апроксимацію – теж у зіставленні з непараметричною оцінкою щільності розподілу (рис. 1, *б*); апроксимовано композиційний розподіл з нормальних локальних компонент (рис. 1, *в*) і композиційний розподіл з логнормальних локальних компонент

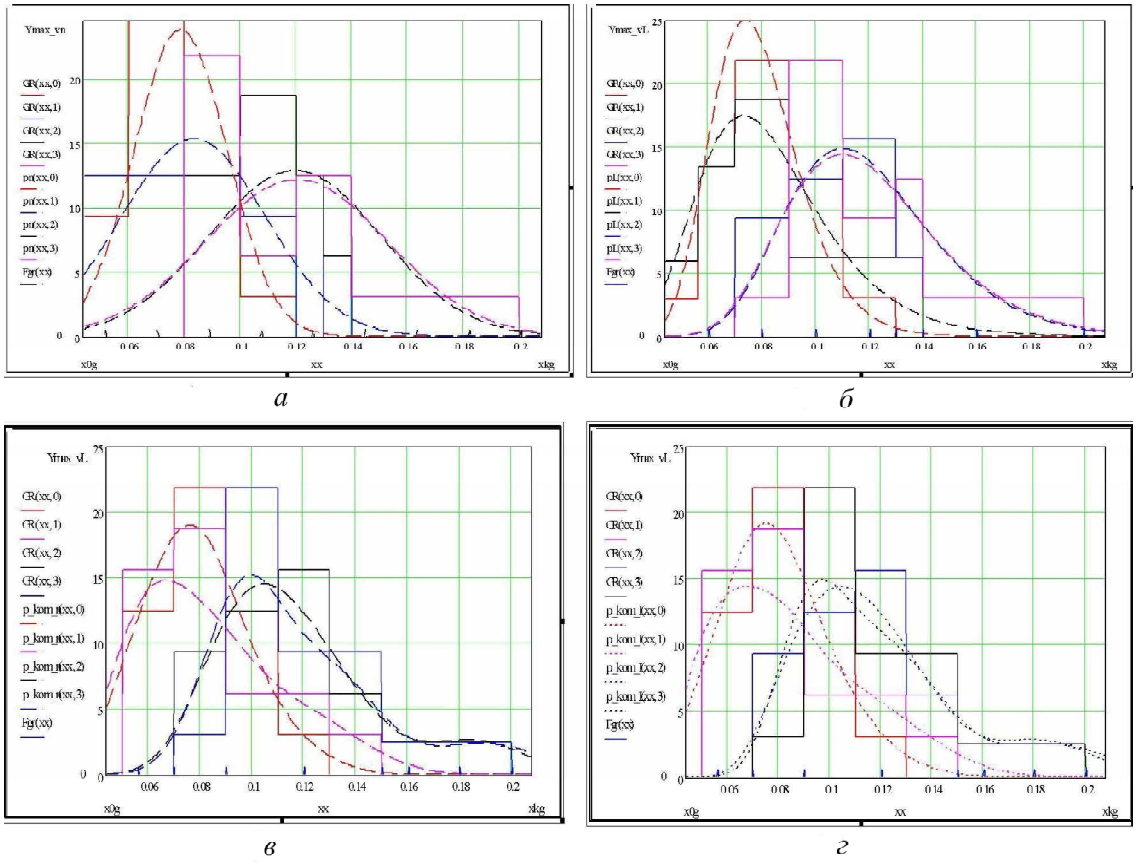

Рис. 1. Розподіл вмісту пилу (мг/м^3) в атмосферному повітрі м. Києва (GR(*xx*, *n*) – гістограма, $n=0$ – у 2001 р., $n=1$ – у 2004 р., $n=2$ – у 2007 р, $n=3$ – у 2010 р.): *а* – нормальний розподіл pn(*xx*, *n*); *б* – логнормальний розподіл p_kom(*xx*, *n*); *в* – композиційний нормальний розподіл p_kom_n(*xx*, *n*); *г* – композиційний логнормальний розподіл p_kom_L(*xx*, *n*)

© М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа

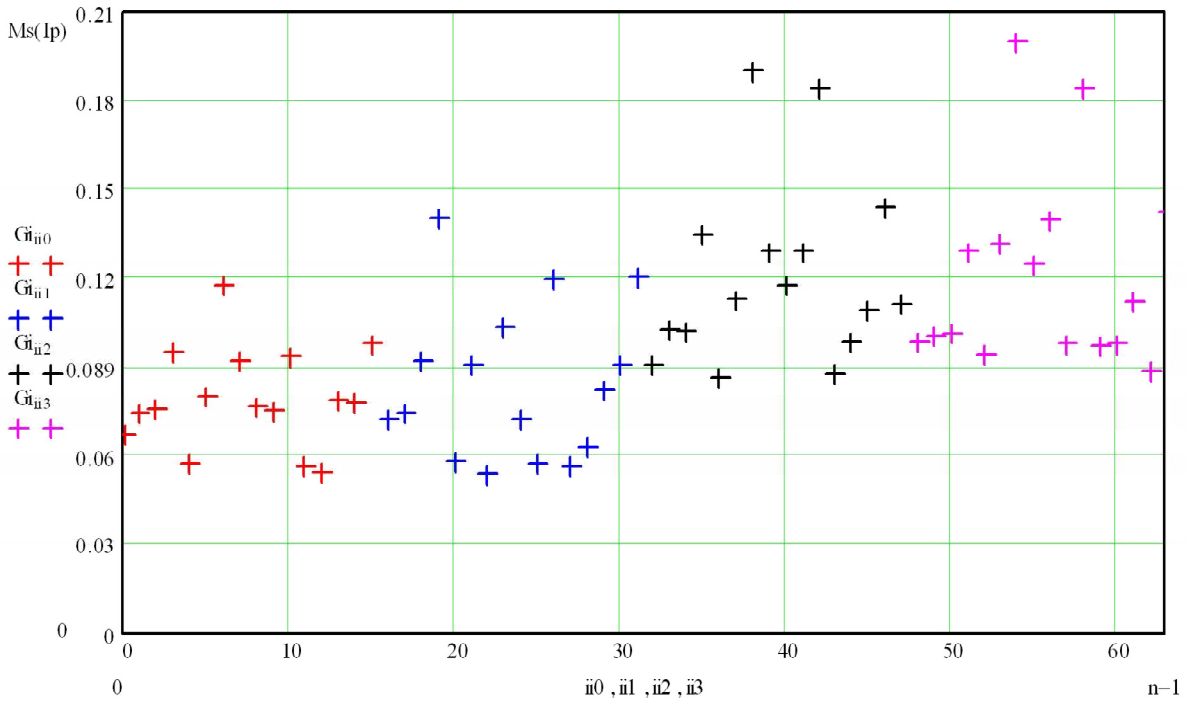

Рис. 2. Відображення спостережень пилу: Gi(ii0) – спостереження 2001 р.; Gi(ii1) – 2004 р.; Gi(ii2) – 2007 р.; Gi(ii3) – 2010 р.

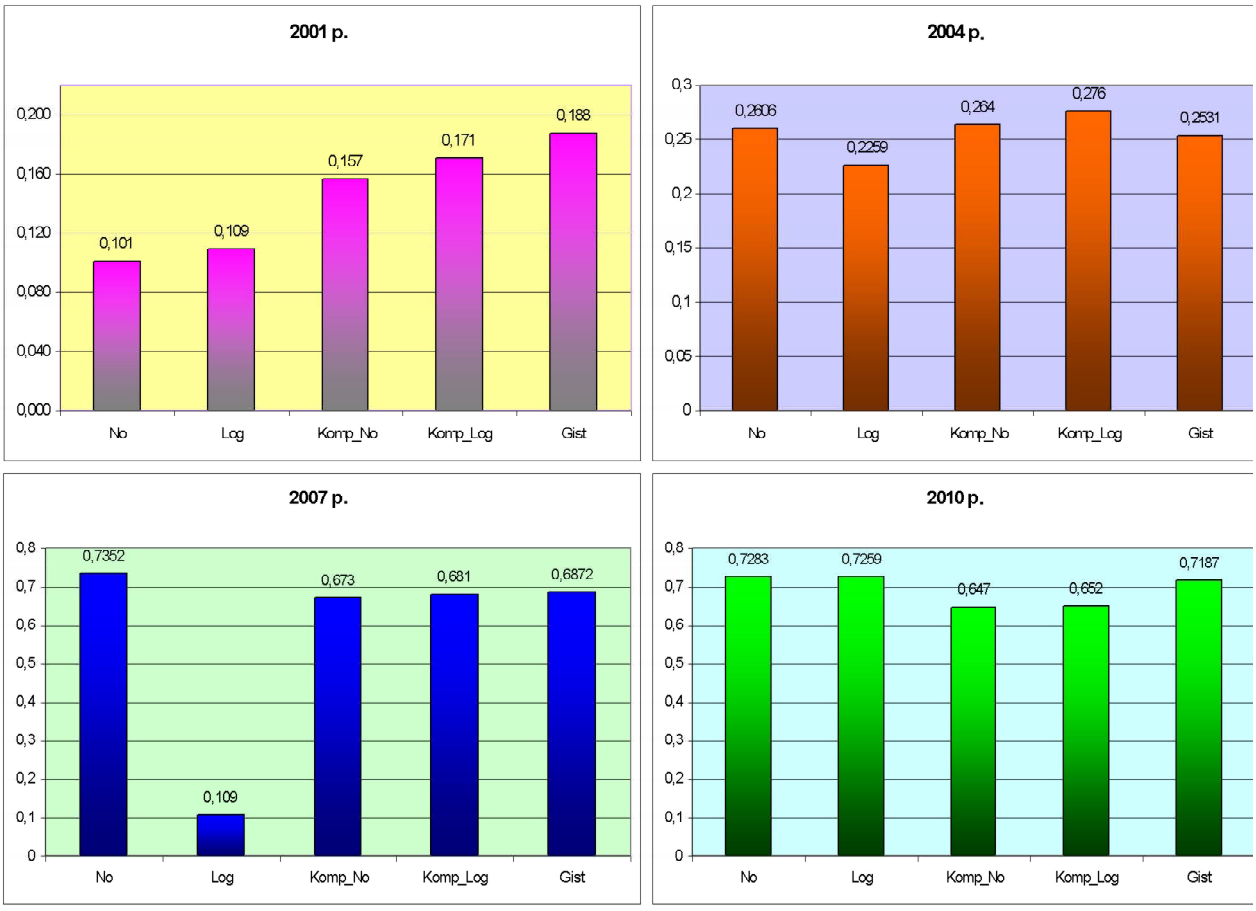

Рис. 3. Графічне відображення оцінок імовірностей перевищення ($A_{кр}$ = 0,1 мг/м^3): No – за нормальною апроксимацією; Log – за логнормальною апроксимацією; P_kom pN – композиція з локальних нормальних розподілів; P_kom pL – композиція з локальних логнормальних розподілів; Gist – за частотою (гістограмою)

© М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа

Таблиця 1. Оцінки ймовірностей перевищення критичної межі вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва, за даними ЦГО у 2001–2010 рр.

Домішка	$A_{кр}$	ГДК	Рік	No	Log	Komp_No	Komp_Log	Gist
Пил	0,1	0,15	2001	0,1005	0,109	0,157	0,171	0,1876
	0,1	0,15	2004	0,2606	0,2259	0,264	0,276	0,2531
	0,1	0,15	2007	0,7352	0,109	0,673	0,681	0,6872
	0,1	0,15	2010	0,7283	0,7259	0,647	0,652	0,7187
Діоксид сірки	0,01	0,04	2001	0,8342	0,8342	0,739	0,747	0,7366
	0,01	0,04	2004	0,9715	0,9563	0,979	0,978	0,9999
	0,01	0,04	2007	0,1335	0,8342	0,128	0,138	0,0998
	0,01	0,04	2010	0,7465	0,6124	0,796	0,8	0,7879
Діоксид азоту	0,013	0,04	2001	0,0219	0,0295	0,087	0,095	0,0878
	0,013	0,04	2004	0,9169	0,9076	0,88	0,879	0,867
	0,013	0,04	2007	0,0032	0,0295	0,0003	0,0015	0
	0,013	0,04	2010	0,4431	0,3462	0,55	0,556	0,5876
Оксид вуглецю	1,5	3	2001	0,7367	0,6386	0,646	0,662	0,7056
	1,5	3	2004	0,7245	0,6551	0,61	0,627	0,7533
	1,5	3	2007	0,4532	0,6386	0,405	0,43	0,426
	1,5	3	2010	0,3038	0,2038	0,217	0,253	0,1728

Таблиця 2. Значення ГДК забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва

Речовина	Концентрація, мг/м^3		Клас небезпеки
	середньодобова	максимальна разова	
Формальдегід	0,003	0,035	2
Діоксид азоту	0,04	0,2	2
Завислі часточки (пил)	0,15	0,5	3
Діоксид сірки	0,05	0,5	3
Оксид вуглецю	3,0	5,0	4

Таблиця 3. Результати перевірки нульової гіпотези про нормальний розподіл вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва, за даними ЦГО 2001–2010 рр.

Домішка	N	Рік	$A/A_{кр}$	$E/E_{кр}$	Відповідність гіпотезі	Домішка	N	Рік	$A/A_{кр}$	$E/E_{кр}$	Відповідність гіпотезі
Пил	7095	2001	0,373	0,026	Так	Діоксид азоту	12067	2001	0,059	0,446	Так
	8126	2004	0,572	0,201	,,		12590	2004	0,276	0,387	,,
	8399	2007	0,912	0,162	,,		13048	2007	1,231	0,658	Ні
	7871	2010	1,018	0,244	Ні		11981	2010	0,819	0,049	Так
Діоксид сірки	12210	2001	0,059	0,446	Так	Оксид вуглецю	9345	2001	0,118	0,511	,,
	12590	2004	0,276	0,387	,,		9967	2004	0,569	0,295	,,
	13048	2007	1,231	0,658	Ні		6991	2007	0,804	0,181	,,
	11981	2010	0,819	0,049	Так		9592	2010	1,369	0,69	Ні

Примітка. Тут і в табл. 4: N – кількість спостережень; $A/A_{кр}$, $E/E_{кр}$ – відношення оцінок коефіцієнтів асиметрії та ексцесу до критичних меж, обчислених за рівня значущості 0,05.

Таблиця 4. Результати перевірки нульової гіпотези про логнормальний розподіл вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва, за даними ЦГО 2001–2010 рр.

Домішка	N	Рік	$A/A_{кр}$	$E/E_{кр}$	Відповідність гіпотезі	Домішка	N	Рік	$A/A_{кр}$	$E/E_{кр}$	Відповідність гіпотезі
Пил	7095	2001	–0,027	–0,201	Так	Діоксид азоту	12067	2001	0,038	0,454	Так
	8126	2004	0,238	–0,414	,,		12590	2004	0,432	0,375	,,
	8399	2007	0,576	–0,113	,,		13048	2007	1,685	1,405	Ні
	7871	2010	0,727	–0,096	,,		11981	2010	1,187	0,366	,,
Діоксид сірки	12210	2001	0,038	0,454	,,	Оксид вуглецю	9345	2001	0,331	0,434	Так
	12590	2004	0,432	0,375	,,		9967	2004	0,039	0,367	,,
	13048	2007	1,685	1,405	Ні		6991	2007	0,139	0,249	,,
	11981	2010	1,187	0,366	,,		9592	2010	0,443	0,014	,,

(рис. 1, *г*). Обсяг статті обмежує можливість подати результати статистичного аналізу усіх забруднювальних речовин (діоксиду сірки, діоксиду азоту та оксиду вуглецю). Для них проведено однакові процедури обробки. Висновки виявилися ідентичними тим, що наведено нижче. Результати вимірювання вмісту пилу подано на рис. 2. На основі одержаних апроксимацій обчислено оцінки площ, де рівень критичних меж перевищений (рис. 3).

За даними рис. 1 можна зробити висновок, що найкращими є композиційні моделі (*в*, *г*), гіршою – логнормальна модель (*б*). Ці висновки підтверджуються результатами застосування критеріїв згоди, а також оцінками площ перевищення граничних концентрацій та їх зіставленням з прямою оцінкою за частотою перевищення (рис. 3). Відзначається вражаюче збільшення площ з підвищеним вмістом пилу протягом досліджуваного періоду. Для ілюстрації використано критичну межу $D_{кр}$ на рівні 0,1 мг/м^3: вона перевищена у 2010 р. на 71 % площі, тоді як у 2001 р. – лише на 19 % площі. Не менш приголомшуючі дані отримано стосовно інших забруднювальних речовин (табл. 1). Площа, де критична межа для вмісту діоксиду сірки становить 0,01 мг/м^3, збільшилась з 2001 р. у 1,05 раза – з 74 до 78 %, тоді як площа, де критична межа діоксиду азоту становить 0,013 мг/м^3, збільшилась майже у 6,5 раза – з 9 до 59 %. Головною причиною погіршення якості атмосферного повітря є пересувні джерела, з яких перше місце займають автотранспорт, а також підприємства енергетики.

Таблиця 5. Результати перевірки гіпотез про нормальність та логнормальність за середнім абсолютним значенням

Домішка	Рік	d_n	d_L	Домішка	Рік	d_n	d_L
Пил	2001	–0,474	–0,59	Діоксид азоту	2001	0,532	0,595
	2004	0,2	0,436		2004	0,111	0,014
	2007	–0,292	–0,083		2007	0,756	**1,3**
	2010	–0,096	0,389		2010	0,154	0,656
Діоксид сірки	2001	0,532	0,595	Оксид вуглецю	2001	0,694	0,426
	2004	–0,111	–0,014		2004	0,083	0,212
	2007	–0,756	**–1,3**		2007	0,28	0,159
	2010	–0,154	–0,656		2010	**1,277**	0,813

Примітка. Відношення нормованого середнього абсолютного значення до критичної межі за рівня значущості 0,05: d_n – для нормального закону, d_L – для логнормального. Виконання умови $|d_n| \geq 1$ означає відхилення гіпотези про нормальність, а умови $|d_L| \geq 1$ – гіпотези про логнормальність. Жирним шрифтом виділено значення, яким не відповідає суперечність спостережень гіпотезі.

Таблиця 6. Результати перевірки гіпотези про логнормальний закон розподілу за альтернативи нормального закону

Домішка	Рік	P_L	Домішка	Рік	P_L
Пил	2001	0,589	Діоксид азоту	2001	0,297
	2004	0,781		2004	1,0
	2007	0,853		2007	0,947
	2010	0,894		2010	1,0
Діоксид сірки	2001	0,297	Оксид вуглецю	2001	1,0
	2004	1,0		2004	1,0
	2007	1,0		2007	0,583
	2010	1,0		2010	1,0

Примітки. Імовірність належності виборки: P_L – до логнормального закону; $P_N = 1 - P_L$ – до нормального закону.

Таблиця 7. Критерій згоди за методом максимальної правдоподібності для конкуруючих гіпотез: нормального закону (N), логнормального (LN), композиційної нормальної моделі (KN), композиційної логнормальної моделі (KL)

Домішка	Рік	P_Z	Закон	Домішка	Рік	P_Z	Закон
Пил	2001	0,254	**KL**	Діоксид азоту	2001	0,115	**KL**
	2004	0,416	**KL**		2004	0,497	**KL**
	2007	0,484	**KL**		2007	0,51	KN
	2010	0,518	**KL**		2010	0,507	**KL**
Діоксид сірки	2001	0,115	**KL**	Оксид вуглецю	2001	0,432	**KL**
	2004	0,497	**KL**		2004	0,469	**KL**
	2007	0,51	KN		2007	0,279	**KL**
	2010	0,507	**KL**		2010	0,525	**KL**

Примітки. P_Z – максимальні бейєсівські ймовірності відповідності закону (моделі). Жирним шрифтом виділено найімовірніше визнану композиційну логнормальну модель (KL), запропоновану авторами.

© *М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа*

Для оцінки динаміки забруднення атмосферного повітря проведено оцінку площ, на яких вміст забруднювальних речовин перевищує критичні межі (табл. 1).

У табл. 2 наведено перелік забруднювальних речовин, ГДК і клас небезпеки. Згідно з класом небезпеки, найшкідливішою складовою забруднення атмосферного повітря Києва є оксид вуглецю (4-й клас).

Кількісну оцінку ступеня адекватності моделей розподілу проведено на основі критеріїв за методом моментів, середнім абсолютним значенням [2] і критерієм нормальності з альтернативою логнормального закону. Встановлено (табл. 3–7), що нормальний та логнормальний закони вміст забруднювальних речовин описують надто наближено. За результатами графічних оцінок розподілів, подібних наведеним на рис. 1, якість апроксимації композиційно-логнормальною моделлю суттєво краща, ніж інших моделей.

Висновки. Із наведених використаних моделей розподілу вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі м. Києва найкращими виявилися композиційно-логнормальна та композиційно нормальна моделі. Ці моделі дають змогу виконувати стійкі оцінки площ перевищення критичних меж вмісту забруднювальних речовин. Площі перевищення критичних меж вмістів згаданих речовин збільшилися з рівнів 9–74 % у 2001 р. до 59–78 % у 2010 р. Негативна динаміка екологічного стану повітря в Києві потребує впровадження невідкладних заходів, спрямованих на вдосконалення технології моніторингу повітря та поліпшення екологічної ситуації в цілому.

1. *Екологічний* паспорт Києва (2010 р.) [Електрон. ресурс]. – К.: Мін-во екології та природ. ресурсів України. – Режим доступу: http://menr.gov.ua/ecopasport/Kyiv_ecopasport_2010.doc – Заголовок з екрана.
2. *Жуков Н.Н.* Вероятностно-статистические методы анализа геолого-геофизической информации. – К.: Вища шк., 1975. – 299 с.
3. *Жуков М.Н.* Імовірнісна оцінка забруднення природного середовища на основі моделювання розподілів вмісту хімічних елементів (на прикладі поверхневих вод Полтавської області) / М.Н. Жуков, А.В. Клипа, І.Р. Стахів, М.В. Макаренко // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія. – 2012. – № 46. – С. 47–50.
4. *Зеркалов Д.В.* Екологічна безпека та охорона довкілля. – К.: Основа, 2011. – 249 с.
5. *Національна* доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2009 році. – К.: Центр екол. освіти та інформації, 2011. – 383 с.
6. *Старченков І.В.* Вдосконалення структурної моделі розсіювання шкідливих викидів в атмосфері / І.В. Старченков, О.Ю. Карпінський // Зб. матеріалів II Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю, 2009 р. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://eco.com.ua.
7. *Щорічник* стану забруднення атмосферного повітря на території України [за даними державної системи спостережень гідрометслужби]. – К., 2011. – С. 27–30.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
E-mail: fatix@ukr.net

Надійшла до редакції 22.10.2012 р.

Н.Н. Жуков, И.Р. Стахив, А.В. Клыпа

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ МЕГАПОЛИСОВ (НА ПРИМЕРЕ г. КИЕВА)

Проведен сравнительный анализ моделей распределения содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Киева с использованием максимально правдоподобных оценок параметров: нормального, логнормального, композиционного с нормально распределенными локальными составляющими, композиционного с логнормальными локальными составляющими. Доказано, что последние две модели позволяют выполнять устойчивые оценки площадей превышения критических границ содержания вредных веществ. Согласно оценкам, состояние загрязнения атмосферного воздуха г. Киева с 2001 по 2010 г. существенно ухудшилось, особенно по содержанию пыли, диоксида серы, диоксида азота.

Ключевые слова: атмосферный воздух, содержания загрязняющих веществ, композиционно-нормальная модель, композиционно-логнормальная модель, предельно допустимая концентрация (ПДК).

© М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа

M.N. Zhukov, I.R. Stakhiv, A.V. Klypa

MODELING OF THE POLLUTANTS CONTENT IN THE MEGAPOLIS ATMOSPHERE (BASED ON KYIV DATA)

A comparative analysis was carried out of pollutants content distribution models in the air of Kyiv, with the most plausible estimates of the parameters, such as normal, lognormal, composite with normally distributed local ingredients, and composite with lognormal local ingredients. It is shown that the latter two models can produce stable estimates of areas where critical limits of harmful substances are above the norm. The assessments in Kyiv were made in period of 2001 trough to 2010. It is shown that the state of air pollution in Kyiv from 2001 to 2010 has worsened, especially as regards dust, sulfur dioxide and nitrogen dioxide.

Keywords: air, pollutants content, composition normal model, composition lognormal model, maximum permissible concentration (MPC).

© М.Н. Жуков, І.Р. Стахів, А.В. Клипа