

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У МІСТАХ****METHOD OF FORECASTING OF POLLUTION OF ATMOSPHERIC AIR IN THE CITIES****Володимир БОЙКО,***Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України», Київ***Volodymyr BOIKO,***Public Institution «Institute of Environmental Economics and Sustainable Development of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv*

*Запропоновано методика прогнозування забруднення атмосферного повітря у містах, яка базується на розробленому математичному апараті, що враховує показники його забруднення та економічного розвитку. Процес прогнозування включає аналіз та вирівнювання рядів динаміки, безпосереднє здійснення прогнозу на основі виявленої тенденції явища та перевірки його достовірності. У ході аналізу рядів динаміки головним завданням є встановлення компонентів, на які можна розкласти динамічний ряд, а вирівнювання – виявлення тренду, що передбачає виділення загальної тенденції часового ряду. Обґрунтовано можливість використання різних математичних функціональних залежностей для прогнозу забруднення атмосферного повітря, що визначається наявною статистичною базою і встановленою тенденцією.*

**Ключові слова:** *прогнозування, методика, атмосферне повітря, забруднення.*

*The article deals with a method of forecasting of pollution of atmospheric air of cities that based on the developed mathematical apparatus, which include the parameters of its pollution and economic development. The process of forecasting includes the analysis and alignment of the dynamics rows, implementation of forecasting based on the main revealed tendency and verification of its reliability. The main thing of analyzing of dynamics rows is the definition of components, which can be decomposed into a dynamic rows, and alignment – the establishment of a trend, which involves the selection of the general trend of the time series. It is considered that depending on the existing statistical base and the established trend, a number of mathematical functional dependences can be used for the forecast of atmospheric air pollution.*

**Key words:** *method of forecasting, atmospheric air, pollution.*

**Постановка проблеми.** Прогнозування як одна із специфічних форм стратегічно-планувальної діяльності полягає в аналізі, виявленні та обґрунтуванні основних закономірностей і тенденцій розвитку держави й суспільства, передбаченні змін їх умов і факторів, створенні наукової бази для формування виваженої довгострокової державної соціально-економічної політики і прийняття рішень щодо її реалізації. Прогнозування – це необхідний і важливий науково-аналітичний етап процесу розробки стратегії, що одночасно спрямоване на обґрунтування не конкретних планових заходів, а тенденцій розвитку соціально-економічних процесів, проблем, які необхідно вирішити в майбутньому. Наукове прогнозування ґрунтується на пізнанні об'єктивних закономірностей, логіці, якісній інформації, математичних методах. Закон України «Про державне прогнозування та розроблення програм економічного і соціального розвитку України» [1] визначає правові, економічні та організаційні засади формування цілісної системи прогнозних і програмних документів економічного та соціального розвитку держави і її регіонів. Роль прогнозування невпинно зростає у зв'язку з прискоренням науково-технічного прогресу, ускладненням завдань управління, посиленням невизначеності, пов'язаної з переходом до ринку.

Одним із найважливіших видів прогнозування є екологічне. У Законі України «Про охорону навколишнього природного середовища» містяться положення щодо необхідності розроблення і прийняття коротко- та довгострокових прогнозів змін довкілля [2]. При цьому актуальним є прогнозування забруднення атмосферного повітря, особливо у містах. Воно базується на передбаченні якісних змін атмосфери з урахуванням закономірностей її розвитку та перспектив ефективного використання цього ресурсу, а також пов'язане з оцінкою обсягів виробництва, вартісних макроекономічних показників, розвитком виробничих відносин, динамікою виробництва та споживання, науково-технічним прогресом тощо.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Проблемам екологічного прогнозування присвячено низку праць таких учених, як Є.П. Качан [3], Б.М. Данилишин, В.В. Ковтун, А.В. Степаненко [4], Т.Є. Царик, В.В. Файфура [5] та інших. Серед останніх публікацій варто відзначити наукові розробки А.В. Степаненка, Г.О. Обиход, А.А. Омельченко [6, 7]. Проте в них недостатньо уваги приділяється теоретичним дослідженням і методичним розробкам у сфері прогнозування забруднення атмосферного повітря у містах.

**Метою статті** є обґрунтування методики прогнозування забруднення атмосферного повітря у містах.

**Виклад основного матеріалу.** Для здійснення прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря у містах існує достатня кількість методик, проте, як правило, вони стосуються конкретних забруднювачів і окремих міст згідно з їх фізико-географічними умовами. Наприклад, методика, розроблена УкрНДГМІ, передбачає прогнозування ступеня забруднення повітря фенолом, діоксидом азоту та пилом з урахуванням температури повітря, різниці температур між рівнями, напрямку та швидкості вітру на висоті флюгера, типу

синоптичного процесу тощо, а темпи розвитку економіки і т.п. залишаються поза увагою

Якісний прогноз пов'язаний з необхідністю дослідити процеси, які відбуваються в навколишньому природному середовищі, економіці та суспільстві, й відобразити їх кількісно. Відповідно до цього складовою методикою прогнозування забруднення атмосферного повітря є сукупність конкретних методів і прийомів економічних, техніко-економічних, економіко-математичних розрахунків.

Прогноз має базуватися на певних методологічних принципах, які гарантуватимуть його якість і точність, а саме:

- *цілісності* – забезпечується розробленням взаємоузгоджених прогнозних і програмних документів економічного й соціального розвитку України, окремих галузей економіки, адміністративно-територіальних одиниць на коротко- та середньостроковий періоди;

- *об'єктивності* – прогноз формується на основі даних органів державної статистики, уповноваженого центрального органу виконавчої влади з питань економічної політики, інших центральних і місцевих органів виконавчої влади й місцевого самоврядування тощо;

- *науковості* – передбачає розроблення прогнозних і програмних документів економічного та соціального розвитку на науковій основі, постійне удосконалення методології, використання відповідного світового досвіду;

- *дотримання державних інтересів* – прогноз має узгоджуватись із завданням забезпечення і реалізації загальнодержавної соціально-економічної політики та економічної безпеки країни;

- *обґрунтованості* – формування прогнозу за допомогою певної дослідницької процедури (алгоритму) на основі ретроспективної інформації, тобто його основою є базовий період, за даними якого встановлюється екстрапольована закономірність;

- *верифікованості* – потребує визначення достовірності, точності й обґрунтованості прогнозів. Під достовірністю розуміють оцінку вірогідності його здійснення для заданого довірчого інтервалу, точністю – оцінку останнього для заданої вірогідності його здійснення. Якщо розуміти під достовірністю і точністю звичайні математично-статистичні параметри (обчислене значення і середньоквадратичне відхилення), то зрозуміла їх необхідність використання, інакше неможливо визначити, збігся прогноз із дійсністю чи ні. Під визначенням обґрунтованості розуміють певні характеристики, які дають змогу оцінити правильність прогнозу.

Розробка прогнозу забруднення атмосферного повітря передбачає наявність певним чином структурованої інформації про її теперішній стан та минулий період, а також допоміжної інформації щодо тенденцій суспільного розвитку. Збір і підготовка таких даних передбачає проведення насамперед ретроспективного аналізу, що уможливорює виявлення напрямів розвитку процесів, явищ і причини, які впливали на ситуацію в минулому. Крім цього,

необхідно здійснити ґрунтовний аналіз сучасного стану з метою визначення базового рівня для здійснення прогнозу.

Дослідження забруднення і змін в атмосферному повітрі виконується на основі аналізу динамічних рядів, що є послідовністю цифрових рівнів показника ( $y_1 y_2 \dots y_n$ ). Щоб такий ряд міг стати основою для прогнозу, він повинен відповідати певним вимогам, зокрема:

- правильна періодизація – поділ явища на однорідні етапи розвитку (в нашому дослідженні – рік);
- однорідність окремих рівнів часового ряду – використання показників, що характеризують особливості розвитку одних і тих же об'єктів (забруднення атмосферного повітря);
- зіставність рівнів з погляду однорідності одиниць виміру, оскільки критерії забруднення атмосферного повітря повинні бути однаковими на всіх рівнях часового ряду;
- відповідність величини часових інтервалів інтенсивності процесу або явища;
- упорядкування рівнів у часі.

Процес прогнозування відбувається послідовно в кілька етапів (рис.).

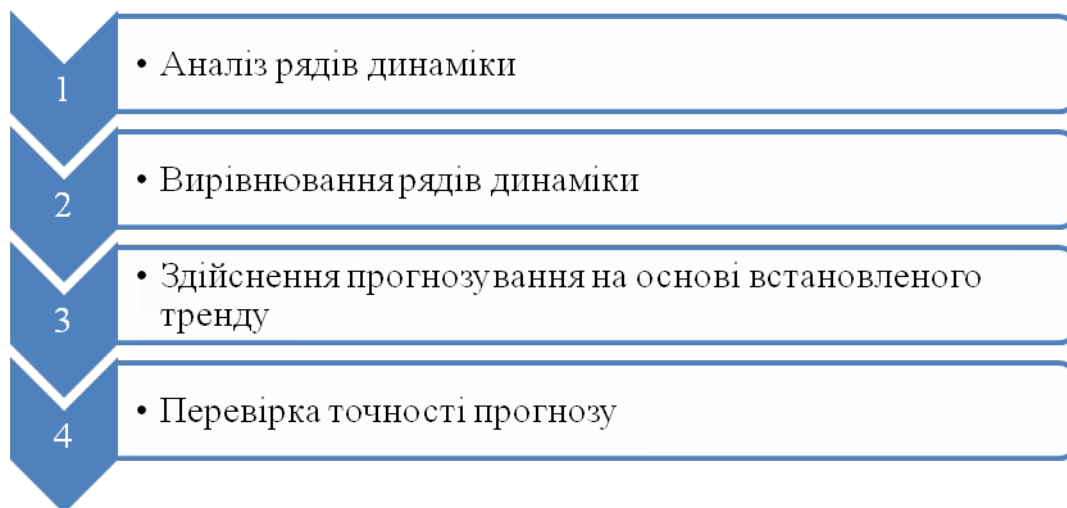


Рис. Етапи формування прогнозу (розроблено автором)

Основним завданням аналізу рядів динаміки є встановлення компонентів (показників), на які можна розкласти динамічний ряд. Відповідно, базою для прогнозування забруднення атмосферного повітря має бути сукупність даних, приведених до інтегрального показника, що характеризують рівень забрудненості хімічними домішками. До таких показників належать забруднення пилом, діоксидом сірки та азоту, розчинними сульфатами, оксидом вуглецю, сірководнем, фенолом, сажею, фтористим і хлористим воднем, вуглеводнями, аміаком, сірчаною кислотою, формальдегідом, металами та іншими речовинами.

Показникова база формується шляхом виявлення факторів, під впливом яких відбувається досліджуваний процес. Вони поділяються на:

- *довготривалі* – визначають загальний напрям зміни явища, яке аналізується. Стосовно забруднення атмосферного повітря довготривалими факторами є стан нормативно-правової бази (наприклад, перелік забруднювачів, за якими проводяться вимірювання), стабільність політичної системи, насиченість території потенційно небезпечними об'єктами, рівень їх безпеки, стан основних засобів тощо;

- *сезонні* – формують коливання явища, які мають періодичну повторюваність у певний час року. Зокрема, на забруднення атмосферного повітря впливають кліматичні та метеорологічні чинники;

- *циклічні* – приводять до зміни досліджуваного явища, обумовлені впливом довготривалих циклів. Наприклад, на забруднення атмосферного повітря впливають економічні цикли – зростання чи спади;

- *нерегулярні* – поділяються на дві групи: *рантові* (війни, надзвичайні ситуації планетарного масштабу), *випадкові і другорядні* – такі, що мають незначний вплив на явище. Значення, які характеризують розвиток явища у ці часові проміжки, виключаються із періоду спостережень.

Відповідно до наведених факторів рівні часового ряду можна розкласти на складові:

$$Y_t = F_t + S_t + K_t + E_t,$$

де  $Y_t$  – рівні часового ряду;

$F_t$  – трендова,  $S_t$  – компонента,  $K_t$  – циклічна,  $E_t$  – випадкова компонента.

Установлення тренду передбачає виділення загальної тенденції часового ряду, який формується під впливом довготривалих чинників. Це можна здійснювати методами механічного й аналітичного вирівнювання.

Перше виконується за допомогою простих і зважених ковзаючих середніх. Вибір інтервалу згладжування ( $m$ ) залежить від мети дослідження і величини часового ряду ( $m < \frac{n}{3}$ ). Значення динамічного ряду заміняють на середні значення для інтервалу  $m = 2p + 1$ :

$$\widehat{y}_t = \frac{y_{t-p} + y_{t-(p+1)} + \dots + y_{t+p-1} + y_{t+p}}{2p + 1} = \frac{\sum_{i=t-p}^{t+p} y_i}{m},$$

де  $\widehat{y}_t$  – значення ковзаючої середньої для моменту  $t$ ;

$y_t$  – фактичне значення рівня в момент  $t$ .

При застосуванні методу механічного вирівнювання крива зберігає величину значень, але з ряду виключаються максимальні відхилення від середньої.

Аналітичне вирівнювання передбачає етапи вибору типу кривої та розрахунок цифрових значень (оцінювання) її параметрів.

Криві, які використовуються для виявлення тенденції явища при прогнозуванні, поділяються на два класи: такі, що описують процеси з монотонним характером розвитку і відсутністю меж зростання; такі, які в майбутньому мають криву зростання (властиво для забруднення повітря).

Криві зростання в загальному випадку мають таку форму:

$$y_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_p t^p,$$

де  $a_0 = y_1$ ;

$a_1, a_2, a_p$  – темп зростання, прискорення і зміна зростання відповідно.

Основним завданням є визначення параметрів  $a_0, a_1, a_2 \dots a_p$ .

Для вибору кривої, яка найбільш точно описує зміну явища в часі, використовують критерій:

$$\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2 \rightarrow \min,$$

де  $\bar{y}_t$  – розрахункове значення для моменту  $t$ ;

$y_t$  – фактичне значення рівня для моменту  $t$ .

Проаналізувавши достатню кількість достовірної інформації, ефективним є прогнозування за допомогою виявленого тренду явища (здійснення екстраполяції).

Екстраполяція виконується за допомогою рівнянь тренду, які описуються широким спектром залежностей, зокрема: лінійною ( $y = a_0 + at$ ); квадратичною ( $y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$ ); ступеневою ( $y = a_0 t^{u_1}$ ); показниковою ( $y = a_0 a_1^t$ ); експоненційною ( $y = a_0 e^{a_1 t}$ ); експоненційно-ступеневою ( $y = a_0 t^{a_1} e^{a_2 t}$ ); логістичною ( $y = a_1 a_2 (1 + a_1 e^{a_2 t})$ ); гіперболічною ( $y = a_0 + (a_1/x)$ ); Гомперца –  $y = a_0 a_1 e^{-a_2 t}$  та іншими.

Існує кілька видів екстраполяції, якій відповідає певна залежність, що матиме найбільшу точність.

Екстраполяція на основі *середнього рівня* використовується за умови, що цей рівень не має тенденції до зміни (характерне застосування лінійної залежності). У цьому випадку прогнозний рівень дорівнює середньому значенню рівнів у минулому:

$$y_{n+l}^* = \bar{Y},$$

де  $y_{n+l}^*$  – прогнозне значення рівня в точці  $n+l$ ;

$l$  – період упередження;

$\bar{Y}$  – середній рівень ряду  $Y_t$ .

Зауважимо, що у зв'язку з динамічністю стану атмосферного повітря такий вид екстраполяції не є надійним методом прогнозування.

Якщо сукупність стаціонарна, то для оцінки середньої величини необхідно брати якомога більше рівнів. За умови, що ряд має певну тенденцію зміни, то чим він триваліший, тим менше підстав для застосування середнього рівня в цілях прогностичної оцінки.

Екстраполяція на основі *середнього абсолютного приросту* можлива в разі рівномірної зміни рівнів, на що вказують приблизно однакові значення ланцюгових абсолютних приростів. У цьому випадку прогнозування виконується за формулою:

$$y_{n+1}^* = y_n + l\overline{\Delta Y},$$

де  $y_{n+1}^*$  – прогнозна оцінка значення рівня в точці  $n+1$ ;

$y_n$  – фактичне значення в останній  $n$ -й точці ряду;

$l$  – період упередження;

$\overline{\Delta Y}$  – значення середнього абсолютного приросту.

Екстраполяція на основі *середнього темпу приросту* застосовується для прогнозування тих процесів, опис динаміки яких відповідає його показниковій чи експоненційній кривій. Прогнозне значення на  $i$  кроків уперед визначається за формулою:

$$y_{n+1}^* = y_n K^i,$$

де  $K$  – середній коефіцієнт приросту, розрахований для ряду  $Y_t$ .

Перевірка точності прогнозу здійснюється за відповідними показниками. Найбільш поширеним її способом є ретроспективний прогноз, тобто розрахунок для минулого періоду часу і порівняння отриманих результатів із фактичною динамікою. Найчастіше порівнюють величину середньої квадратичної похибки чи середньої похибки апроксимації:

$$|\varepsilon| = \frac{1}{n} \sum \frac{|y^t - \tilde{y}|}{y_t} \times 100\% ,$$

де  $y_t$  – фактичне значення ряду;

$\tilde{y}$  – теоретичне значення, отримане за обраною моделлю.

Чим нижче значення цих показників, тим більша точність прогнозу. Очевидно, що всі показники можна обчислити після завершення періоду упередження, коли будуть відомі фактичні прогнозні значення або за першою частиною ряду будується модель прогнозу, а дані другої використовуються для перевірки точності цієї моделі (тобто розглядається ретроспективний прогноз).

**Висновки.** Прогнозування забруднення атмосферного повітря – це складний процес, який передбачає вирішення комплексу завдань. Необхідно враховувати не лише показники забруднення, а й розвитку економіки, що належить до основних забруднювачів повітря. При цьому важливо здійснити ґрунтовний аналіз і вирівнювання динамічного ряду вибраних показників, підготувати кілька сценаріїв розвитку явища на основі математичних

залежностей і шляхом перевірки точності прогнозу виділити найбільш достовірний результат.

Загалом розробка методики прогнозування забруднення атмосферного повітря у містах як універсального інструмента для прийняття управлінських рішень потребує подальших досліджень, зокрема вдосконалення нормативної бази, розширення мережі міст, у яких виконується моніторинг, та спектру відповідних джерел забруднення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про державне прогнозування та розроблення програм економічного і соціального розвитку України» [Електронний ресурс] / Верховна Рада України. – 2000. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1602-14>.
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» [Електронний ресурс] / Верховна Рада України. – 1991. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/page4>.
3. Регіональна економіка : підручник / за ред. Є.П. Качана. – Т. : ТНЕУ, 2008. – 800 с.
4. Данилишин Б.М. Наукові основи прогнозування природно-техногенної (екологічної) безпеки / Б.М. Данилишин, В.В. Ковтун, А.В. Степаненко. – К. : Лекс Дім, 2004. – 552 с.
5. Царик Т.Є. Основи екології / Т.Є. Царик, В.В. Файфура. – Т., 2009. – 131 с.
6. Екологічна і природно-техногенна безпека України в регіональному вимірі : [монографія] / [М.А. Хвесик, А.В. Степаненко, Г.О. Обиход та ін. ; за наук. ред. д.е.н., проф., акад. НААН України М.А. Хвесика]. – К. : ДУ ІЕПСР НАН України, 2014 р. – 352 с.
7. Екологічна модернізація в системі охорони атмосферного повітря в регіонах України / [А.В. Степаненко, Г.О. Обиход, А.А. Омельченко та ін.]. – К.: ДУ ІЕПСР НАН України, 2016. – 285 с.

### REFERENCES

1. *Zakon Ukrainy "Pro derzhavne prognozuvannja ta rozroblennja program ekonomichnogo i social'nogo rozvytku Ukrai'ny"* [Law of Ukraine "About the state forecasting and development of programs of economic and social development of Ukraine"] (2000) Verhovna Rada Ukrai'ny. Retrieved from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1602-14>.
2. *Zakon Ukrainy "Pro ohoronu navkolyshn'ogo pryrodnogo seredovyshha"* [Law of Ukraine "On Environmental Protection"] (1991) Verhovna Rada Ukrai'ny. Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/page4>.
3. Kachan, Je.P. (2008) *Regional'na ekonomika* [Regional economy]. Ternopil': TNEU [in Ukrainian].
4. Danylyshyn, B.M., & Kovtun, V.V., & Stepanenko, A.V. (2004) *Naukovi osnovy prognozuvannja pryrodno-tehnogennoi' (ekologichnoi') bezpeky* [Scientific



fundamentals of forecasting of natural and man-made (ecological) safety]. Kyiv: Leks Dim [in Ukrainian].

5. Caryk, T.Je., & Fajfura, V.V. (2009) *Osnovy ekologii'* [Principles of Ecology]. Ternopil' [in Ukrainian].

6. Hvesyk, M.A., & Stepanenko, A.V., & Obyhod, G.O. (2014) *Ekologichna i pryrodno-tehnogenna bezpeka Ukrainy v regional'nomu vymiri* [Environmental and natural-technogenic security of Ukraine in the regional dimension]. Kyiv: Public Institution "Institute of Environmental Economics and Sustainable Development of the National Academy of Sciences of Ukraine" [in Ukrainian].

7. Stepanenko, A.V., & Obyhod, G.O., & Omel'chenko, A.A. (2016) *Ekologichna modernizacija v systemi ohorony atmosferного povitrja v regionah Ukrainy* [Ecological modernization in the system of natural and natural-technogenic and ecological safety]. Kyiv: Public Institution "Institute of Environmental Economics and Sustainable Development of the National Academy of Sciences of Ukraine" [in Ukrainian].