

## КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТА НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

І. П. Каменева, А. В. Яцишин, Д. О. Полішко, О. О. Попов –

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України

Рассматривается комплексный подход к анализу экологической безопасности города или региона, включающий проектирование базы данных медико-экологического мониторинга, методы обработки и анализа многомерной информации о загрязнении атмосферы, новые ГИС-технологии построения экологических карт и выявления территорий повышенного риска.

Для облегчения содержательной интерпретации данных мониторинга и результатов анализа разработана система визуализации экологических индексов, которые можно непосредственно наносить на электронную карту города, визуализируя территории с разным экологическим статусом. Данные экологического мониторинга атмосферы города Киева и результаты анализа представлены в виде карт статистических поверхностей.

Complex approach is examined to the analysis of ecological safety of city or region which includes planning of database medical-ecological monitoring, methods of treatment and analysis of multidimensional information about the air pollution of city, new GIS-technologies of construction of ecological cards and exposure of territories of the promoted risk.

For the facilitation of rich in content interpretation of monitoring data and results of analysis the system of visualization of ecological indexes which can be directly plotted on electronic map of city is developed, that expose territories with different ecological status. Ecological monitoring data and the results of treatment are presented as ecological cards of statistical surfaces.

Аналіз екологічної безпеки міста або регіону тісно пов'язаний з дослідженням впливу навколишнього середовища на людину, який можна визначити за допомогою показників захворюваності та смертності у межах певних територіальних комплексів.

Підкреслимо, що в екологічних дослідженнях особливу роль відіграє принцип системності, який орієнтує на дослідження цілісних явищ у їх єдності та внутрішній динаміці. З цієї позиції показники захворюваності та смертності виступають як *індикатори* складних соціально-екологічних процесів, що відбуваються навколо. Отже йдеться про те, щоб з'ясувати причини, які впливають на ці індикатори, зокрема – внесок екологічної складової.

Розглядаючи місто як цілісну систему, можна виділити три фактори, що впливають на екологічну безпеку міського населення: це забруднення атмосфери підприємствами й транспортом, низька якість питної води, невідповідність продуктів харчування необхідним нормам. Проте якщо споживання питної води або продуктів харчування все ж таки припускає можливість щодо контролю й управління якістю (людина може вибирати, що їй вживати), то екологічний стан атмосфери в сучасному місті продовжує погіршуватись під тиском транспорту та інших техногенних навантажень, вкрай обмежуючи можливість управління ситуацією.

Забруднення атмосфери визнано найбільш небезпечним за розміром своїх негативних наслід-

ків, оскільки забруднення міста деякими сполуками вже набуло необоротного характеру й спричиняє негативні зміни здоров'я населення.

У зв'язку з викладеним зростає значення науково-методичного й комп'ютерного забезпечення завдань моніторингу, комплексної оцінки забруднення атмосфери та визначення рівня екологічного ризику для окремих територій, де вирішальну роль відіграють сучасні ГІС-технології й геоінформаційні системи, що забезпечують просторове відображення територіальних об'єктів у вигляді електронних екологічних карт.

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою дослідження є розробка інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою атмосфери на територіальному рівні з використанням ГІС-технологій та екологічного картографування. Система включає науково-методичне та програмно-інформаційне забезпечення завдань моніторингу, контролю й управління станом навколишнього середовища у межах міста або регіону. Вона орієнтована на підтримку прийняття рішень на основі серії тематичних карт: райони міста або окремі території відображаються на електронних картах з нанесенням індексів техногенного забруднення цих територій і рівнів екологічного ризику. Науково-методичні та алгоритмічні основи визначення індексів техногенних навантажень наведено в [1].

Ефективність виконання картографічних робіт, у свою чергу, багато в чому визначається структурою та змістом бази даних. Проектування бази медико-екологічних даних зазвичай включає концептуальний, логічний і фізичний етапи, на кожному з яких розробляються відповідні моделі даних [2].

Концептуальний етап розробки полягає в створенні моделі даних, призначеної для вирішення найбільш загальних питань, і включає опис сутностей, атрибутів та типів даних. Так, у базі даних медико-екологічних досліджень зберігається інформація про результати моніторингу навколишнього середовища й перевищення норм за окремими показниками, дані соціально-демографічних досліджень (у першу чергу, показники народжуваності та смертності), дані про захворювання, пов'язані з дією шкідливих чинників середовища.

Концептуальна схема медико-екологічної бази даних наведена на рис. 1.

На логічному етапі розробляється конкретна структура бази даних, де враховуються наявні форми подання початкових даних. Для аналізу екологічної безпеки м. Києва наповнення бази даних здійснюється на основі щомісячних звітів про забруднення атмосфери [3] й даних Державного комітету статистики (показників захворюваності та смертності). Інформація подана у вигляді окремих файлів форматів програм Excel і Word.

На завершальному етапі проектування бази даних розроблено фізичну модель даних, де враховані особливості програмного забезпечення.

Можна назвати значну кількість комерційних програмних продуктів для зберігання й організації даних. Останнім часом перевага надається реляційній моделі, яка в більшості задач замінила ієрархічну та мережеву. Відповідно до цієї моделі інформацію подано у вигляді двовимірних таблиць, зручних для вибору окремих показників, часових проміжків, які можна об'єднувати, перетинати тощо.

Для взаємодії користувача з базою даних медико-екологічного моніторингу розроблено спеціальний графічний інтерфейс, який забезпечує пошук у таблицях даних, обробку й аналіз статистичної інформації, подання результатів аналізу у вигляді тематичних карт з виділенням небезпечних територій.

У процесі аналізу стану екологічної безпеки за даними екологічного моніторингу виникає необхідність обробки великих масивів статистичної інформації. Якщо прості операції обробки можна реалізувати в Excel, то істотно більше можливостей пропонують спеціалізовані математичні пакети, зокрема пакет Statistica 6.0, який використовувався для розрахунку інтегральних індексів забруднення атмосфери. Результати аналізу інформації також зберігаються в базі даних, оскільки вони можуть бути корисними для наступних етапів аналізу. Тому одержані результати впорядковуються у формі таблиць, що містять узагальнені чисельні характеристики (наприклад, індекси забруднення або рівні ризику), які також можна подати в графічному вигляді.

Завершальною стадією аналізу екологічного стану міста (регіону) є оформлення картографічних зображень із визначенням територій підвищеного ризику.

#### МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ

У процесі прийняття рішень, що ґрунтуються на результатах аналізу даних медико-екологічного моніторингу, особлива роль належить методам, які забезпечують візуальну інтерпретацію багатовимірної екологічної інформації для визначення екологічного статусу територій з високим рівнем техногенних навантажень.

Під візуалізацією ми розуміємо такий спосіб представлення багатовимірного розподілу даних у 2-3-мірному просторі узагальнених координат, який зберігає основні закономірності, властиві початко-

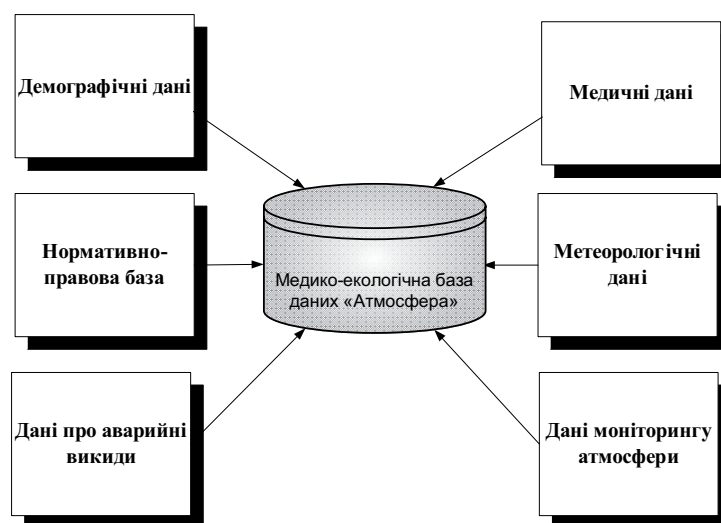


Рис. 1. Структура медико-екологічної бази даних "Атмосфера"

вому розподілу: кластерну структуру, топологічні особливості, внутрішньосистемні зв'язки, відстані в початковому просторі ознак тощо. Одним з напрямів застосування методів візуалізації є уяочення внутрішньої структури багатовимірних екологічних об'єктів на картах. Зокрема, екологічні карти можуть відображати рівні комплексного забруднення атмосфери, ґрунту або водних об'єктів, а також наслідки цих забруднень для населення.

У ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України створено геоінформаційну аналітичну систему аналізу та візуалізації даних медико-екологічного моніторингу України [4]. Основною частиною геоінформаційної системи є аналітичний блок, який забезпечує реалізацію таких функцій:

а) вибір і попередня статистична обробка даних, нормування;

б) аналіз даних, який використовує методи обчислення основних статистик, зокрема багаторівневий алгоритм візуалізації, що включає факторний аналіз (метод головних компонент), кластерний аналіз і багатовимірне шкалювання;

в) прогноз тенденцій розвитку: на основі аналізу тимчасових рядів можна побудувати функціонально-стохастичну модель поведінки окремих компонентів і визначити тенденції розвитку системи в цілому;

г) візуалізація – нанесення результатів аналізу на картографічну основу, створення карт просторових кореляцій, карт просторового розподілу навантажень, узагальнених факторів забруднення, інтегральних оцінок ризику.

В аналітичному блоці передбачена можливість всебічно оцінити наявну інформацію, починаючи від розрахунку основних статистик і закінчуючи побудовою складних функціонально-стохастичних моделей. Аналітичний блок тісно пов'язаний з блоком прийняття рішень, вони взаємно доповнюють один одного.

Сучасні ПС-технології забезпечують просторове представлення екологічних об'єктів у вигляді електронних екологічних карт. У першу чергу, йдеться про карти статистичних поверхонь, які будуються за кількісними значеннями певних екологічних показників [5]. Одним з актуальних завдань цього напрямку є відтворення і візуальне представлення рельєфу статистичної поверхні на основі чисельних значень показників в опорних точках.

Під статистичною поверхнею маємо на увазі візуальне представлення поля *неперервного розподілу* кількісної ознаки по реальній поверхні Землі, де кожна точка цього поля визначається конкретним значенням даної ознаки. Поняття *неперервності* використовується тут у повній відповідності з математичним визначенням неперервної функції, де одне значення ознаки плавно переходить в інше. В нашому випадку значеннями опорних точок є вимірювані екологічні показники, на основі яких

можна побудувати *екологічні карти статистичної поверхні*.

Відзначимо, що статистичний підхід виступає тут перш за все як спосіб узагальнення інформації про численні різноманітні дані, що дозволяє синтезувати уявлення про окремі елементи статистичної сукупності (зокрема, про дані екологічного моніторингу) у цілісний образ – екологічну карту техногенних навантажень.

Розроблено дві групи методів інтерполяції: детерміністські й геостатистичні методи. Якщо детерміністські методи базуються на оцінках схожості між точками вибірки або ступеня згладжування, то геостатистичні методи використовують статистичні властивості опорних точок. Зокрема, методи кригінгу кількості визначають просторову кореляцію між опорними точками навколо невизначеної точки.

Детерміністські методи інтерполяції діляться на глобальні й локальні. Так, модуль Geostatistical Analyst [6] як глобальний інтерполятор використовує метод глобального полінома, а як локальні методи – методи зважених відстаней, локальних поліномів і радіальних базисних функцій. Локальні методи використовують для обчислення невідомих значень тільки опорні точки навколо шуканої точки і виявляються більш зручними для інтерполяції невеликих ділянок досліджуваної території.

Інтерполяція за методом зважених відстаней (IDW) використовує припущення, що об'єкти, розташовані на близькій відстані, більшою мірою схожі, ніж віддалені один від одного. Щоб знайти значення в деякій точці  $s$ , метод IDW використовує опорні точки, розташовані навколо точки  $s$ . При цьому передбачається, що кожна точка чинить локальний вплив, який зменшується з відстанню. Отже, значення показника  $Z(s_0)$  у точці  $s_0(x, y)$  розраховується за формулою:

$$Z(s_0) = \sum_{j=1}^N p_j Z(s_j),$$

де  $N$  – кількість опорних точок навколо точки  $s$ , використаних для обчислення;  $Z(s_j)$  – вимірюване значення в точці  $s_j$ ;  $p_j$  – вагові коефіцієнти, присвоєні опорним точкам, використаним в обчисленнях.

Вагові коефіцієнти визначаються таким чином:

$$p_j = \frac{d_{j0}^{-p}}{\sum_{j=1}^N d_{j0}^{-p}}, \quad \sum_{j=1}^N p_j = 1.$$

У цій формулі  $d_{j0}$  – відстань між шуканою точкою  $s_0$  і опорною точкою  $s_j$ .

Параметр ступеня  $p$  впливає на присвоєння вагових коефіцієнтів опорним точкам таким чином, що вплив цих точок зі збільшенням відстані зменшується за експоненціальним законом.

Оптимальне значення параметра  $p$  визначається в процесі мінімізації середньоквадратичної

помилки обчислень. Значення середньоквадратичної помилки є статистичною величиною і розраховується при перехресній перевірці: кожна опорна точка виключається з обчислень і порівнюється з результатом інтерполяції. Якщо  $p=2$ , отримуємо інтерполяцію за методом квадратичних зважених відстаней.

Зазвичай кількість опорних точок обмежується так званою *областю сусідства*. Форма області сусідства залежить від початкових даних. Якщо визначення вагових коефіцієнтів не залежить від напряму, область сусідства матиме форму круга. У разі впливу за напрямками (наприклад, при заданому напрямі вітру) область сусідства зручно описати еліпсом, вісь якого направлена паралельно вітру.

Таким чином, поверхня, побудована за методом зважених відстаней, залежить від вибору ступеня  $p$  і методу пошуку сусідів. Отримана поверхня чутлива до наявності кластерів і екстремальних значень даних. Метод успішно працює, якщо опорні точки рівномірно розподілені по території і

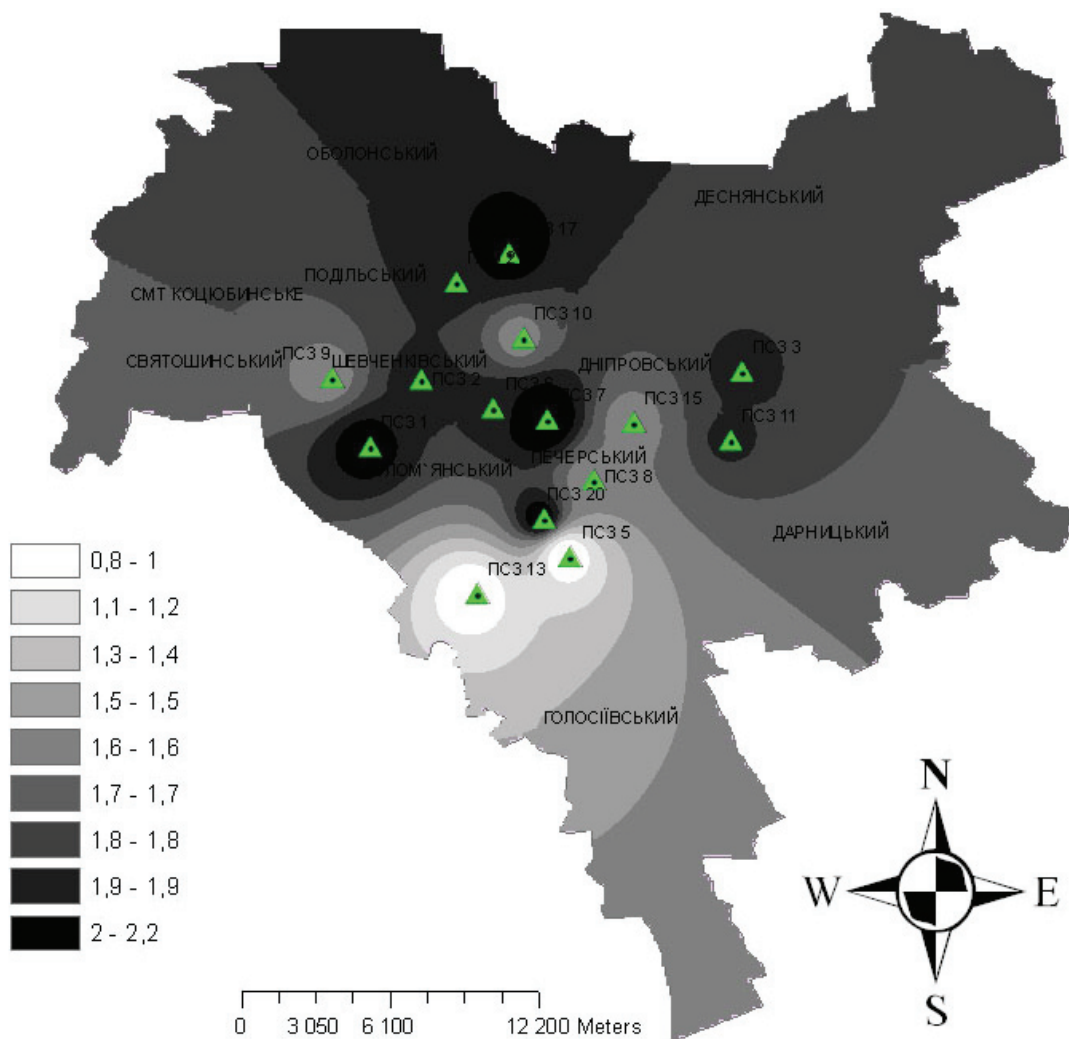
не утворюють кластерів. Таким умовам відповідає розташування пунктів спостереження за станом атмосфери, які достатньо рівномірно розподілені на території міста, чим, власне, і обґрунтовується вибір указанного методу інтерполяції.

Сучасні геостатистичні пакети передбачають декілька способів відображення статистичних поверхонь: контури із заливкою, ізолінії, ґрид (растрове уявлення), розтяжка кольору. Запропоновані також можливості поєднання декількох способів для досягнення додаткових ефектів.

На основі даних моніторингу найбільш небезпечних складових забруднення в окремих районах побудовані карти екологічного стану атмосфери м. Києва.

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ

Для побудови карт екологічного стану приземного шару атмосфери Києва використовувались дані 15 стаціонарних пунктів спостереження з періодичністю відбору проб 6 разів на тиждень.



**Рис. 2.** Карта забруднення атмосфери Києва діоксидом азоту

Визначався 21 показник шкідливих домішок. Для візуалізації отриманої статистичної поверхні були вибрані контури із заливкою.

Попередній аналіз даних моніторингу показав, що середньомісячні концентрації діоксиду азоту (2-й клас небезпеки) за даними 2005 – 2006 рр. більш ніж у два рази перевищують гранично допустимі значення цих концентрацій (ГДК). Також зафіксовано перевищення концентрацій формальдегіду близько 1,3 ГДК. У цілому по місту повторення випадків перевищення максимальної разової ГДК для діоксиду азоту становить майже 60 відсотків від загального числа спостережень. Подібна ситуація повторюється в інших великих містах України, де діоксид азоту також фігурує серед найбільш критичних забруднювачів атмосфери. В зв'язку з цим у нашому прикладі діоксид азоту вибраний як індикатор для побудови екологічних карт.

На рис. 2 подано карту забруднення атмосфери м. Києва діоксидом азоту (січень 2005 р.), яку було отримано в результаті інтерполяції з допомогою методу зважених відстаней. Як значення опорних точок використовувалися не самі концентрації, а рівні перевищення ГДК у відповідних точках території міста.

Отримані рівні забруднення відображені на карті як контури, зафарбовані відповідно до значень шкали, показаної на рис. 2 зліва. Аналіз карти показує, що в січні 2005 року на більшій частині території міста спостерігалось значне перевищення ГДК.

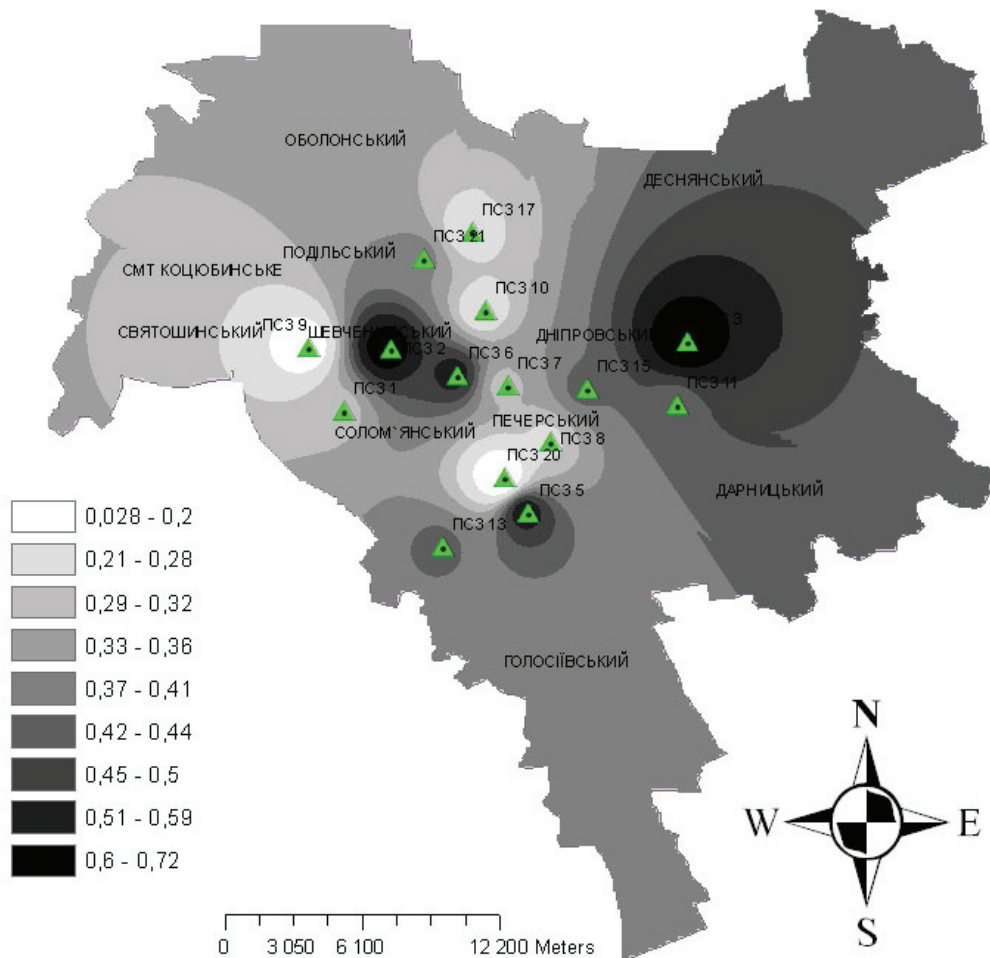
Для порівняння на рис. 3 подано карту екологічного стану атмосфери Києва в серпні 2005 року, побудовану на основі екологічних індексів, що включають сім найбільш небезпечних показників забруднення атмосфери: діоксид азоту, діоксид сірки, чадний газ, аміак, формальдегід, пил, хлористий водень.

Як значення опорних точок для цієї карти використувалися рівні екологічного ризику, розраховані за формулою Л.Ф. Сердюцької [4, 7]:

$$R_i = 1 - d(I_i, I_h) \quad (i = \overline{1, n})$$

де  $R_i$  – екологічний ризик для  $i$ -го пункту спостереження;  $d(I_i, I_h)$  – евклідова відстань між екологічними індексами;  $I_i$  – екологічний індекс забруднення для  $i$ -го пункту;  $I_h$  – екологічний індекс, якому відповідає максимальне забруднення;  $n$  – число пунктів спостереження ( $n = 15$ ).

Порівняльний аналіз показує, що урахування декількох показників одночасно істотно міняє



**Рис. 3.** Карта ризиків, побудована на основі екологічних індексів

сприйняття загальної картини забруднення. У центральній частині міста спостерігається декілька зон підвищеного забруднення, обумовлених особливостями рельєфу місцевості, який перешкоджає швидкому розсіюванню домішок.

Для ранжирування ризиків було вибрано декілька градацій шкали, показаних на рис. 2. Отже, ранжування ризиків проводиться в проміжку від 0,028 до 0,72 (останнє значення відповідає найгіршому еталону). Рівні ризику від 0 до 0,32 відповідають загальноприйняттю уявлення про норму. Проміжок 0,33 – 0,44 розглядається як область помірного ризику, а значення 0,44 – 0,72 відповідають територіям підвищеного ризику, які представляють небезпеку для населення відповідних районів.

### ВИСНОВКИ

Розглядається комплексний підхід до аналізу екологічної безпеки міста, що включає проектування бази даних медико-екологічного моніторингу, методи обробки та аналізу багатовимірної інформації про забруднення атмосфери, нові ГІС-технології побудови екологічних карт та виявлення територій підвищеного ризику.

Для визначення екологічного стану міських територій запропоновано визначити індекси забруднення атмосфери окремих районів міста, отримані в результаті обробки даних моніторингу методами багатовимірного аналізу.

Для полегшення змістовної інтерпретації даних моніторингу та результатів аналізу розроблено систему візуалізації екологічних індексів, які можна безпосередньо наносити на електронну карту, тобто візуалізувати території з різним екологічним статусом.

Дані екологічного моніторингу й результати обробки представлені у вигляді екологічних карт статистичних поверхонь. Екологічні карти, що відображають стан атмосфери, можуть бути побудовані

як на основі даних екологічного моніторингу, так і на основі екологічних індексів. Карти, побудовані на основі екологічних індексів, дають найбільш цілісне й інтегроване уявлення про екологічний стан досліджуваної території, оскільки одночасно враховується цілий ряд особливо небезпечних показників.

Запропоновані методи, що базуються на сучасних ГІС-технологіях побудови статистичних поверхонь, містять нові можливості для інтерпретації даних моніторингу атмосферних забруднень і результатів аналізу. На прикладі м. Києва демонструється наочне уявлення про рівні екологічного ризику в умовах посилення техногенних навантажень на атмосферне повітря.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Сердюцкая Л.Ф., Каменева И.П. Системный анализ и математическое моделирование медико-экологических последствий аварии на ЧАЭС и других техногенных воздействий. – К.: Медэкол, 2000. – 173 с.
2. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Каргашин П.Е., Садов А.П. Принципы создания баз данных в медико-экологическом геоинформационном картировании // Геоинформатика. – М., 2006. – № 1. – С. 6–16.
3. Щомісячний бюлетень забруднення атмосферного повітря в Києві та містах Київської області № 1(144), № 8(151) – К.: Центральна геофізична обсерваторія, 2005.
4. Сердюцкая Л.Ф., Каменева И.П., Яцишин А.В. Методические основы и компьютерные средства анализа экологической безопасности объектов топливно-энергетического комплекса // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. – К., 2007. – № 3. – С. 28–34.
5. Гультяев А.К., Машин В.А. Проектирование и дизайн пользовательского интерфейса. – СПб.: Корона принт, 2000. – 352 с.
6. Джонсон К. ArcGIS Geostatistical Analyst. Руководство пользователя. – М.: Дата+, 2001. – 278 с.
7. Сердюцька Л.Ф. Математичне моделювання впливу техногенних навантажень на екологічні системи / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – К., 2004. – 42 с.