

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 504.064

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-117-124

ДИНАМІЧНО ДЕКОМПОЗИЦІЙНИЙ ПІДХІД ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТ

М. В. Крихівський, В. І. Михайлів, Л. В. Саманів

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: rta@nung.edu.ua

Розвиток технологій та виробництва сьогодні тісно пов'язаний з запобіганням негативного впливу на навколишнє середовище міждержавними договорами та законодавством країн. Проте єдиної методології оцінювання антропогенної діяльності в контексті змін в екологічних системах поки не існує. Різні підходи до цієї проблеми призводять до різних методик та, відповідно, до різних результатів.

Основна увага наукових розробок в цій галузі приділяється процесам забруднення довкілля, викидам і відходам промислових виробництв та життєдіяльності. Саме зміни, а найбільш небезпечні з них незворотні, є тим аспектом, що в повній мірі відображають адекватність в оцінюванні рівня екологічної безпеки. Тому важливою й актуальною задачею науки сьогодні слід вважати прогнозування змін в екологічних системах внаслідок впливу природних і антропогенних факторів. Розв'язок цієї задачі неможливий без розроблення нових математичних методів діагностики.

Дослідження спрямовано на розроблення інструментів підтримки стратегічного екологічного оцінювання екологічних систем міст в контексті концепції оцінки впливів на навколишнє середовище. Запропоновано теоретичний інструмент, що дає можливість як прогнозування, так і дослідження існуючої ситуації.

У роботі розглянуто новий науково-практичний підхід до діагностики екологічного стану природно техногенних компонентів міст (урбоєкосистем). Оцінювання рівня екологічної безпеки пропонується виконувати математичним моделюванням системи зі змінною структурою. В основі дослідження – траєкторія нечітких структур екосистеми, що поєднує інтегральні показники та біоіндикацію.

Запропонована математична модель дозволить формалізувати зміни в навколишньому середовищі. Такий підхід удосконалює методологію комплексного оцінювання всіх компонент довкілля та дозволить використовувати обчислювальну техніку, що зробить діагностику більш об'єктивною. Запропонована теорія обґрунтовує метод динамічної декомпозиції на основі нечітких станів екосистеми.

Формалізація може бути використана для автоматизації діагностики екологічної безпеки екологічних систем та розроблення алгоритмічного забезпечення комплексного аналізу на рівні природно техногенних комплексів міст.

Ключові слова: діагностика урбоєкосистеми; комплексна оцінка рівня екологічної безпеки; динамічна декомпозиція; нечіткий стан екосистеми.

Развитие технологий и производства сегодня тесно связано с предотвращением негативного воздействия на окружающую среду межгосударственными договорами и законодательством стран. Однако единой методологии оценки антропогенной деятельности в контексте изменений в экологических системах пока не существует. Различные подходы к этой проблеме приводят к различным методикам и, соответственно, к разным результатам.

Основное внимание научных разработок в этой области уделяется процессам загрязнения окружающей среды, выбросов и отходов промышленного производства и жизнедеятельности. Именно изменения, а наиболее опасные из них необратимы, является тем аспектом, который в полной мере отражают адекватность в оценке уровня экологической безопасности. Поэтому важной и актуальной задачей науки сегодня следует считать прогнозирование изменений в экологических системах вследствие воздействия природных и антропогенных факторов. Решение этой задачи невозможно без разработки новых математических методов диагностики.

Исследование направлено на разработку инструментов поддержки стратегического экологического оценивания экологических систем городов в контексте концепции оценки воздействия на окружающую среду. Предложено теоретический инструмент, дающий возможность как прогнозировать, так и исследовать существующую ситуацию.

В работе рассмотрен новый научно-практический подход к диагностике экологического состояния естественных техногенных компонентов городов (урбоэкосистем). Оценка уровня экологической безопасности предлагается выполнять математическим моделированием системы с переменной структурой. В основе исследования – траектория нечетких структур экосистемы, объединяющей интегральные показатели и биоиндикацию.

Предложенная математическая модель позволит формализовать изменения в окружающей среде. Такой подход совершенствует методологию комплексной оценки всех компонентов окружающей среды и позволит использовать для этих целей вычислительную технику, сделает диагностику более объективной. Теория динамической декомпозиции обосновывает метод оценивания уровня экологической безопасности на основе нечетких состояний экосистемы.

Формализация может быть использована для автоматизации диагностики экологической безопасности городов и разработки алгоритмического обеспечения комплексного анализа на уровне естественно техногенных комплексов городов.

Ключевые слова: диагностика урбоэкосистемы; комплексная оценка уровня экологической безопасности; динамическая декомпозиция; нечеткое состояние экосистемы.

The development of technologies and production today is closely connected with the prevention of negative impact on the environment by interstate agreements and the legislation of countries. However, a unified methodology for assessing anthropogenic activity in the context of changes in ecological systems does not yet exist. Different approaches to this problem lead to different methods and, accordingly, to different results.

The main focus of scientific developments in this area is paid to the processes of environmental pollution, emissions and waste of industrial production and life. It is the changes, and the most dangerous of them are irreversible, that is the aspect that fully reflect the adequacy in assessing the level of environmental safety. Therefore, an important and urgent task of science today should be considered predicting changes in ecological systems due to the impact of natural and anthropogenic factors. The solution to this problem is impossible without the development of new mathematical diagnostic methods.

The study is aimed at developing tools to support strategic environmental assessment of ecological systems of cities in the context of the concept of environmental impact assessment. A theoretical tool is proposed that makes it possible to both predict and investigate the existing situation.

The paper considers a new scientific and practical approach to diagnostics of the ecological state of natural technogenic components of cities (urban ecosystems). It is proposed to assess the level of environmental safety by mathematical modeling of a system with a variable structure. The study is based on the trajectory of fuzzy structures of the ecosystem, combining integral indicators and bioindication.

The proposed mathematical model will make it possible to formalize changes in the environment. This approach improves the methodology for a comprehensive assessment of all components of the environment and will allow the use of computer technology for these purposes, and will make the diagnosis more objective. The theory of dynamic decomposition substantiates a method for assessing the level of environmental safety based on fuzzy states of the ecosystem.

Formalization can be used to automate the diagnostics of the ecological safety of cities and to develop algorithmic support for complex analysis at the level of natural technogenic complexes of cities.

Key words: diagnostics of urban ecosystem; comprehensive assessment of the level of environmental safety; dynamic decomposition; fuzzy state of the ecosystem.

Вступ

Однією із актуальних проблем діагностики стану довкілля є оцінювання змін, що відбулися як внаслідок антропогенної дії, так і через інші причини з метою подальшого запобігання негативних впливів. За способом комплексного врахування стану різних природних компонент (літосфера та мінерально сировинні ресурси,

геофізсфера та космічні ресурси, геоморфосфера та територіальні ресурси, поверхнева та підземна гідросфера, динаміка й якість водних ресурсів, атмосфера та кліматичні ресурси, педосфера та земельні ресурси, фітосфера та рекреаційні ресурси, зоосфера, демосфера) методи часто поділяють на інтегральні та диференційні. Диференціальні не передбачать

оцінювання загального стану довкілля, а дозволяють детально дослідити певну сферу, тому їх можна вважати допоміжними. Особливо важливим є дослідження змін стану як прояв негативного або позитивного антропогенного впливу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Методи оцінювання рівня екологічної небезпеки класифікують неоднозначно через різні підходи та відсутності єдиної теорії, яка б охоплювала всі аспекти проблематики. Однією з найбільш загальних можна вважати ієрархічну класифікацію методів оцінки стану на основі двох типів: інтегральних, що агрегують всі природні компоненти, та диференційні, що сфокусовані на локальні завдання [1]. Авторами зроблено висновок про обмежену сферу застосування в стратегічному вимірі керування екологічною безпекою інтегральних методів, які поділені на два класи: розрахункові (що характеризується кількісними показниками) та біоіндикацію (непрямі методи оцінки). Вони вважають, що перспективними в плані комплексної оцінки динаміки зміни екологічної небезпеки є біоіндикація. Диференціальні методи рекомендують для розроблення стратегії мінімізації затрат на оцінювання.

Важливе значення для екологічної стійкості навколишнього середовища має структурна та параметрична ідентифікація рівноваги систем і необоротних процесів, визначених самоорганізацією об'єкта [2]. У цій роботі для комплексного оцінювання якості стану і процесів усіх складових досліджуваних природно-техногенних систем введені імовірнісні характеристики процесів стабілізації та дестабілізації в аналізованих об'єктах, які впливають на обчислення ризику здоров'ю людей.

Ще одним підходом є MIPS-аналіз [3], характерною рисою якого є статичність. Його розрахункові значення визначають вплив на компоненти навколишнього природного середовища матеріально-енергетичних потоків відповідно до кількості виробленої чи утилізованої продукції. Зазначається, що остаточної інформації, що відбувається в об'єкті дослідження не буде встановлено. Спільно з MIPS-аналізом доцільно застосовувати аналізом стосовно екологічного ризику негативного

впливу як міри відхилення від природних чи нормативних показників якості систем природного середовища, включаючи і стан людини, тобто аналізом ризиків.

Оцінювання ризиків для довкілля внаслідок антропогенного впливу є досить вивченим та ефективним [4, 5]. Автори виділяють декілька типів методик оцінки екологічного ризику: якісні оцінки (традиційні, на основі думок експертів); кількісні (на основі статистики проявів та наслідків екологічних ризиків); інтегральні (визначення розміру ризику на основі кількох основних факторів); експрес-оцінки; метод «дельта» (розрахунок поточного значення ризику, що динамічно змінюється на основі попередньої оцінки та поточних значень факторів, що впливають на розмір ризику); комплексні (на базі спеціальних наукових досліджень). Запропоновано кількісні значення інтегральних оцінок загроз, що характеризують екологічну безпеку України для кожного із регіонів України. Проведено ідентифікацію розрахункових величин відповідно до запропонованого числового інтервалу величини екологічного ризику.

У роботі [6] виконаний пошук адекватної оцінки процесів, що відбуваються в природному середовищі під впливом посилення антропогенного навантаження, що є важливою передумовою для своєчасного виявлення загроз національній безпеці в екологічній сфері і своєчасного реагування на них. Здійснення такої оцінки потребує використання кількісних показників, що в достатній мірі характеризують стан національної безпеки в екологічній сфері. У роботі враховано, що значення цих показників змінюються в часі під впливом багатьох чинників. Відсутність припустимих меж коливань значень цих показників ускладнює процес оцінки ситуації та виявлення загроз національній безпеці в екологічній сфері. На основі аналізу існуючої нормативно-правової бази, результатів наукових досліджень, досвіду міжнародних організацій та розвинутих країн щодо оцінки стану екологічної ситуації сформовано перелік конкретних показників, що кількісно оцінюють стан безпеки в екологічній сфері, та зроблена спроба визначити їх порогові значення.

Інтегральний показник запропоновано в роботі [7]. Авторами проаналізовано стан

показників навколишнього природного середовища, таких як атмосферне повітря (18 показників), водні ресурси (30 показників), земельні ресурси (10 показників), лісові ресурси (12 показників), надра (7 показників) та екзогенні геологічні процеси (22 показники), відходи (18 показників). Їх комплексна оцінка дала змогу визначити рівень безпечності природокористування та можливості виникнення загроз екологічного характеру, за умови, що збережеться існуюча тенденція антропогенного навантаження. Запропоновано компонування векторів показників первинної інформації для розрахунку інтегральної оцінки небезпеки окремого блоку та нормування показників, тобто перехід від абсолютних за своїм характером показників до відносних показників; Для визначення вагових коефіцієнтів використано метод головних компонент, котрий трансформує m -вимірний ознаковий простір у r -вимірний простір компонент.

Авторами роботи [8] запропонована екологічна стратегія міста з інформаційною базою, яка повинна містити дані про місцеві природні ресурси, користувачів цих ресурсів та стан довкілля. Для цього використовуються геоінформаційні технології, що дозволяють збирати, накопичувати та зберігати інформацію про наявні природні ресурси, їх користувачів, стан навколишнього середовища, а також прогнозувати зміни екологічній ситуації на підставі імітаційного моделювання змін у та оцінювати екологічні ризики.

Оцінювання екологічного стану території в [9] розглянуто у визначенні: процес порівняння сукупності екологічних станів об'єктів з певними нормами з урахуванням потенційно можливих впливів зовнішніх факторів, зокрема факторів ризику надзвичайних ситуацій. У такому сенсі при оцінюванні результатів негативних впливів на об'єкт та навколишнє природне середовище необхідно враховувати якнайбільшу кількість індивідуальних особливостей об'єкта за ризиком виникнення на ньому надзвичайних ситуацій техногенного чи природного характеру. Методологічною основою роботи було обрано метод імітаційного моделювання, який дозволив перейти до аналізу екологічного резерву. Сформульовано та представлено у формалізованому вигляді

інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за показником рівня її екологічного резерву. Новизна отриманого результату полягає у використанні логістичної моделі для кількісного опису залежностей величин, які характеризують деградаційні процеси в екосистемах, у якості відгуків навколишнього природного середовища на дію факторів негативного впливу.

Теорія методу динамічної декомпозиції запропонована у роботі [10], що може бути використана для моделювання складних динамічних систем зі змінним складом і структурою. Складна динамічна система S , в структуру якої можуть входити взаємодіючі динамічні системи S_1, S_2, \dots, S_n в певний момент часу визначається функціями $\gamma_i(t)$. Значення $\gamma_i(t) = 1$, якщо S_i в момент часу t входить в S , і $\gamma_i(t) = 0$ в іншому випадку ($i = 1, 2, \dots, n$). Вектор $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_n(t))$ є структурою системи S в момент часу t .

З метою діагностування змін як зміну біологічних маркерів введена метрика в просторі траєкторій динамічних систем. Вважаючи \mathcal{Y} множиною всіх можливих структур ($\gamma \in \mathcal{Y}$) метрику ρ в \mathcal{Y} визначено як $\rho(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) = \sum_{i=1}^n |\gamma_i^{(1)} - \gamma_i^{(2)}|$, де $\gamma^{(j)} = (\gamma_1^{(j)}, \dots, \gamma_n^{(j)}) \in \mathcal{Y}$ і $j = 1, 2$.

Система зі структурними змінами повністю визначається множиною $\{\mathcal{Y}(S), \Omega_{\mathcal{Y}(S)}, \tau_{\mathcal{Y}(S)}, \Phi_{\mathcal{Y}(S)}, \Psi_{\mathcal{Y}(S)}, \Theta_{\mathcal{Y}(S)}\}$. Елементи цієї множини: $\mathcal{Y}(S)$ – структурний простір системи, тобто простір структур, які система S може мати в процесі існування ($\mathcal{Y}(S) \subset \mathcal{Y}$); $\Omega_{\mathcal{Y}(S)} = \{\Omega(\gamma) : \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина фазових просторів $\Omega(\gamma)$ динамічних систем $S(\gamma)$; $\tau_{\mathcal{Y}(S)} = \{\tau(\gamma) : \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина розбиттів фазових просторів $\Omega(\gamma)$, тобто $\tau(\gamma) = \{\Omega_p(\gamma) : \Omega(\gamma) = \cup_p \Omega_p(\gamma); \Omega_p \cap \Omega_q = \emptyset; p \neq q; p, q \in P(\gamma)\}$ і $P(\gamma)$ – множина індексів; $\Phi_{\mathcal{Y}(S)} = \{S(\gamma) : \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина динамічних систем $S(\gamma)$, що задані в фазових просторах $\Omega(\gamma)$; $\Psi_{\mathcal{Y}(S)} = \{\psi_{pq}(\gamma, \gamma')\}$ – множина відображень переходу з $\Omega_p(\gamma)$ в $\Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$ і $\Omega_p(\gamma)$ – межа $\Omega_p(\gamma)$; $\Theta_{\mathcal{Y}(S)} = \{\theta_{pq}^+, p \in P(\gamma), q \in P(\gamma')\}$ – множина функцій часових затримок переходу від структури γ до структури γ' .

Функціонування системи S описується послідовністю структур $\{\gamma^{(k)}\}$. Траєкторія динамічної системи $S \in X(t, t_0, X_0(\gamma)) = X_0(\gamma) \in \Omega_p(\gamma) \subset \Omega(\gamma)$. Якщо траєкторія не потрапляє на межу $\Omega_p(\gamma)$, то структура при $t \geq t_0$ залишається

незмінною: $\gamma(t) = \gamma$. Якщо t_p^- – перший момент часу такий, що $X(\gamma) = X(t_p^-, t_0, X_0(\gamma)) \in \Omega_p(\gamma)$, то відображення переходу $\psi_{pq}(\gamma, \gamma')$, переводить $X(\gamma)$ в точку $X_0(\gamma') \in \Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$, $\gamma' \in Y$, $q \in P(\gamma')$ де γ' , q залежать від γ , p , $X(\gamma)$, t_p^- . Відображення може бути задано динамічною системою. Далі в момент часу $t_q^+ = \theta^+_{q}(\gamma, p, X(\gamma), t_p^-) \geq t_p^-$ починає діяти динамічна система $S(\gamma')$. При цьому з умови $t_q^+ \geq t_p^-$ випливає, що при $t_q^+ > t_p^-$ у проміжку (t_p^-, t_q^+) відбувається перемикання структури системи, тобто в загальному випадку перемикання відбувається не миттєво. При $t \in (t_p^-, t_q^+)$, тобто в режимі перемикання, можливо одне з двох: або система не функціонує, тобто має фіктивну структуру $(\gamma(t) = (0, 0, \dots, 0))$, або S функціонує, але зберігає структуру γ , тобто відбувається затримка при переході до структури γ' . Режим перемикання може здаватися динамічною системою.

Вплив довкілля на здоров'я людей можна вважати першочерговою задачею, у якій проблема візуального забруднення поки що мало вивчена. Візуальне середовище може помітно впливати на стан здоров'я людей, що пов'язано з біологією зору, а саме з автоматією сакад. Оцінювання такого впливу найчастіше пропонують виконувати та роблять за допомогою аналізу фотокопій публічних місць та опитуваннями експертів. У роботі [11] в рамках динамічно декомпозиційного підходу запропоновано метод оцінювання забруднення візуального середовища міст, що дозволить зменшити неточності оцінювання рівня екологічної безпеки візуального середовища міст. Цим методом пропонується використовувати складне динамічне зображення S , в структуру якого можуть входити взаємодіючі динамічні зображення S_1, S_2, \dots, S_n , які в певний момент часу визначаються функціями $\gamma_i(t)$. Значення $\gamma_i(t) = 1$, якщо S_i в момент часу t входить в S , і $\gamma_i(t) = 0$ в іншому випадку ($i = 1, 2, \dots, n$). Вектор $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_n(t)) \in$ структурою зображення S в момент часу t .

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Розрізняють, як мінімум, п'ять основних взаємодоповнюючих методів оцінювання рівня екологічної безпеки міст: матричним метод, метод сполученого аналізу карт, система

потоківих діаграм, метод імітаційного моделювання та метод експертних груп. Причинно-наслідкові зв'язки між можливими впливами на об'єкти встановлюються матричним методом. Широко поширений метод сполученого аналізу карт, що дозволяє визначати і демонструвати масштаби поширення впливу. Добре зарекомендувала себе система потоківих діаграм, яка описує природні системи як складні структури масообміну. Використовується метод імітаційного моделювання. Метод експертних груп, незважаючи на його недоліки (суб'єктивність оцінок тощо), служить для визначення граничних параметрів впливу і використовується для побудови шкал оцінок впливу і різного роду матриць.

У матричного методі оцінки впливу об'єктів на природне середовище використовують різні типи матриць. Наприклад, матриця Л. Леопольда призначена для оцінювання впливу проектів, яка дає наочне уявлення про структуру взаємодій. Проте вона виявляє лише первинні зміни в природі і не дозволяє прослідкувати весь ланцюг складних взаємодій. У більш складних матрицях (матриці Баттеле) проводиться ранжування інтенсивного впливу (надається вага або бал інтенсивності) і змін в екосистемах (визначається значущість зміни під впливом об'єкта, визначається вплив). Агреговані показники розраховуються при перемноженні ваги впливу та значущості змін в екосистемах, потім ці значення підсумовуються по горизонталі і вертикалі матриці щоб визначити найбільш інтенсивні зони впливу та найбільш чутливі або найбільш мінливі об'єкти, які відчувають вплив.

Застосовують чотири типи матриць (від простих – вплив на компоненти природи до більш складних), які дозволяють виявити і віддалені наслідки впливів, а також простежити поширення змін у природі (ланцюгові реакції) та зворотний вплив зміненої природи на діяльність суспільства ($X + H$), а також наслідки цього впливу, тобто поширення наслідків у суспільстві ($H + X$) і ланцюгові реакції в діяльності людини.

Спільний аналіз карт вперше був використаний Я. Мак Харгом, який застосував поєднання схем на кальці для оцінки впливу на середовище. Суть методу полягала в тому, що

досліджувана територія поділялася на ділянки (виходячи з топографічних характеристик, типів землекористування тощо) та по кожній ділянці збиралася інформація за компонентами навколишнього середовища і потенціальними впливами на них. Для кожного з показників і для кожного варіанту проекту викреслювалися схеми на кальці, поєднанням яких виявлялися як інтенсивність порушень середовища, так і чинники природного та соціально-економічного характеру, що ускладнюють здійснення проекту.

Для визначення первинних змін і ланцюга їх наслідків застосовується також метод поточкових діаграм і мережевих графіків, або ступінчаста матриця, розроблена Дж. Соренсенем. Метод передбачає складання переліку різних варіантів землекористування та характерних для них типів впливів. Далі визначаються пов'язані з цими впливами початкові зміни стану окремих компонентів природного середовища (в даному прикладі – зміна стоку води в естуарій) і наступні, спричинені вже порушеннями в природному середовищі (наприклад, скорочення популяцій риб).

На відміну від матриці взаємодії компонентів цей метод наочно показує не тільки напрямок, але і сутність зв'язків різного порядку між компонентами природного середовища. Він дає можливість простежити за динамікою впливів, тобто показати можливі зміни як під час спорудження, так і після завершення будівництва об'єкта. Але при збільшенні числа аналізованих показників метод стає громіздким і складним для аналізу. Тому його застосування можливе для проектів з обмеженим числом впливів. Недолік методу полягає також в обліку змін лише елементів природного середовища.

Для оцінки впливу на навколишнє середовище використовуються також математичні моделі, в тому числі імітаційні, що відображають кількісні залежності між впливами і дозволяють розглядати соціальні і природні системи як безперервно розвиваються і змінюються. Метод імітаційного моделювання знаходиться в початковій стадії розвитку, що пов'язано з недостатньою вивченістю порушених екосистем. В існуючих моделях акцент робиться, як правило, на один компонент екосистеми. У більш складних моделях,

розроблених для цілих екосистем, недостатньо повно враховуються соціально-економічні показники, оскільки введення додаткових даних робить моделі некерованими. Тим не менше на майбутнє цей підхід розглядається як вельми перспективний. »

Враховуючи недоліки існуючих методів і відсутність єдиної методології оцінювання рівня екологічної безпеки територій і, зокрема, міст, актуальним є удосконалення методів діагностики за допомогою математичного моделювання. Для зменшення неточності оцінювання рівня екологічної безпеки візуального середовища міст пропонується метод динамічної декомпозиції.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є розроблення нових математичних підходів з визначення оптимальної моделі діагностики рівня екологічної безпеки міст для прийняття управлінських рішень. У ході теоретичного аналізу інформації щодо досягнення мети поставлені і розв'язані такі задачі:

- розроблення теоретичних основ єдиного підходу до формування комплексної екологічної оцінки факторів різних компонент навколишнього середовища;

- формування системи оцінювання з урахуванням специфіки функціонування і екологічної поведінки системних об'єктів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Діагностування екологічних систем часто пов'язано з оцінюванням змін, особливо незворотних. Проблема такого діагностування актуальна оскільки раціональне функціонування підприємств, міст набуває все більшого значення у зв'язку з посиленням антропогенних впливів на навколишнє середовище. Важливим є можливість використання методу динамічної декомпозиції з метою розв'язування задачі моделювання динаміки розвитку з урахуванням природоохоронних витрат. Системи зі змінною в процесі функціонування структурою характерні для багатьох задач екології та раціонального природокористування.

Для зменшення неточності оцінювання рівня екологічної безпеки візуального середовища міст пропонується метод динамічної декомпозиції. Динамічна екосистема міста S , в структуру якого можуть входити

взаємодіючі динамічні зображення S_1, S_2, \dots, S_n в певний момент часу визначається функціями $\gamma_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Значення $\gamma_i(t)$ набуває з відрізка $[0; 1]$. Якщо S_i в момент часу t повністю співпадає з структурою урбоекосистеми, тоді $\gamma_i(t) = 1$. Якщо S_i в момент часу t повністю не співпадає з структурою урбоекосистеми, тоді $\gamma_i(t) = 0$. В іншому випадку $0 < \gamma_i(t) < 1$ є мірою подібності. Вектор $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_n(t))$ визначає структуру екосистеми S в момент часу t . Зміни в екосистемах відображаються траєкторією базисних структур S_i . Всі можливі структури утворюють множину Y . Для чисельного порівняння визначається метрика ρ для $\gamma \in Y$ як $\rho(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) = \sum_{i=1}^n |\gamma_i^{(1)} - \gamma_i^{(2)}|$, де $\gamma^{(i)} = (\gamma_1^{(i)}, \dots, \gamma_n^{(i)}) \in Y$ $i = 1, 2$.

Рівень екологічної безпеки визначається змінами, що повністю визначається множиною $\{Y(S), \Omega_{Y(S)}, \tau_{Y(S)}, \Phi_{Y(S)}, \Psi_{Y(S)}, \Theta_{Y(S)}\}$. Елементи цієї множини: $Y(S)$ – структурний простір станів урбоекосистеми, тобто простір структур, які екосистема S може мати в процесі існування ($Y(S) \subset Y$); $\Omega_{Y(S)} = \{\Omega(\gamma) : \gamma \in Y(S)\}$ – множина фазових просторів $\Omega(\gamma)$ динамічних станів $S(\gamma)$; $\tau_{Y(S)} = \{\tau(\gamma) : \gamma \in Y(S)\}$ – множина розбиттів фазових просторів $\Omega(\gamma)$, тобто $\tau(\gamma) = \{\Omega_p(\gamma) : \Omega(\gamma) = \cup_p \Omega_p(\gamma); \Omega_p \cap \Omega_q = \emptyset; p \neq q; p, q \in P(\gamma)\}$ і $P(\gamma)$ – множина індексів; $\Phi_{Y(S)} = \{S(\gamma) : \gamma \in Y(S)\}$ – множина динамічних станів $S(\gamma)$, що задані в фазових просторах $\Omega(\gamma)$; $\Psi_{Y(S)} = \{\psi_{pq}(\gamma, \gamma')\}$ – множина відображень переходу з $\Omega_p(\gamma)$ в $\Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$ і $\Omega_p(\gamma)$ – межа $\Omega_p(\gamma)$; $\Theta_{Y(S)} = \{\theta_{pq}^+, p \in P(\gamma), q \in P(\gamma')\}$ – множина функцій часових затримок переходу від структури γ до структури γ' . Функціонування урбоекосистеми S описується послідовністю структур $\{\gamma^{(k)}\}$. Траєкторією динамічного перетворення станів $S \in X(t, t_0, X_0(\gamma)) = X_0(\gamma) \in \Omega_p(\gamma) \subset \Omega(\gamma)$. Якщо траєкторія не потрапляє на межу $\Omega_p(\gamma)$, то структура при $t \geq t_0$ залишається незмінною: $\gamma(t) = \gamma$. Якщо t_p^- – перший момент часу такий, що $X(\gamma) = X(t_p^-, t_0, X_0(\gamma)) \in \Omega_p(\gamma)$, то відображення переходу $\psi_{pq}(\gamma, \gamma')$, переводить $X(\gamma)$ в точку $X_0(\gamma') \in \Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$, $\gamma' \in Y$, $q \in P(\gamma')$ де γ', q залежать від $\gamma, p, X(\gamma), t_p^-$. Відображення може бути задано динамічним станом екосистеми. Далі в момент часу $t_q^+ = \theta_{pq}^+(\gamma, p, X(\gamma), t_p^-) \geq t_p^-$ починає діяти динамічне зображення $S(\gamma')$. При цьому з умови $t_q^+ \geq t_p^-$ випливає, що при $t_q^+ > t_p^-$ у проміжку (t_p^-, t_q^+) відбувається перемикавання

структури стану, тобто в загальному випадку перемикавання відбувається не миттєво.

Висновки

У результаті теоретичних досліджень розроблено математичне забезпечення комплексної діагностики рівня екологічної безпеки міст, що є інформаційною основою для прийняття ефективного управлінського рішення. Визначені теоретичні основи формування математичного моделювання динаміки змін у екосистемах.

Література

1. Мальований М. С., Шмандій В. М., Харламова О. В., Челядин Л. І., Сакалова Г. В. Аналіз та систематизація існуючих методів оцінювання ступеня екологічної небезпеки. *Екологічна безпека*. 2013. Вип. 1(15). С. 37–44.
2. Шаронова Н. В., Козуля М. М. Моделювання природно-техногенних систем та комплексна екологічна оцінка якості довкілля. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. Х.: НТУ «ХПІ» 2014. № 16 (1059). С. 76 – 81.
3. Козуля Т. В., Ємельянова Д. І., Козуля М. М. Комплексна екологічна оцінка природно-техногенних комплексів на основі MIPS- і ризик-аналізу. *Восточноевроп. журн. передових технологій*. Х., 2014. № 3 (69). С. 8–14.
4. Лисиченко Г. В., Забулонв Ю.Л., Хміль Г. А. Природний, техногенний та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. *Наук. думка*, 2008. – 543 с.
5. Гадецька З. М., Кузьмич Н. В. Оцінка екологічного ризику на території України. *Ефективна економіка*. 2015. № 12. С. 46-54.
6. Щодо оцінки викликів національній безпеці в екологічній сфері. Аналітична записка Національний інститут стратегічних досліджень. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/schodo-ocinki-viklikiv-nacionalniy-bezpeci-v-ekologichniy-sferi>
7. Обиход Г. О., Омеляненко Т. Л. Методичні підходи щодо оцінки рівня екологічної небезпеки регіонів України [Електронний ресурс]. *Ефективна економіка*. 2012. №10. Режим доступу <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1429>

8. Богачов С. В. Шляхи зміцнення екологічної безпеки міста [Електронний ресурс] *Ефективна економіка*. 2019. № 6. Режим доступу: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2019/15.pdf

9. Вамболь С. А., Колосков В. Ю., Деркач Ю. Ф. Оцінювання екологічного стану територій, прилеглих до місць зберігання відходів, на основі критерію екологічного резерву. *Техногенно-екологічна безпека*. 2017. Вип. 2. С. 67–72. - Режим доступу: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/JournalTechnogenicAndEcologicalSafety/Vol-2/Vambol.-Vol-2-2017-67-72.pdf>

10. Кириллов А. Н. Методы математического моделирования динамики систем со структурными изменениями в задачах экологии и рационального природопользования : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. фіз.-мат. наук : 05.13.18 – теоретичні основи математичного моделювання, чисельні методи та комплекси програм / А. Н. Кириллов; ПДУ. – Петрозаводск, 2009. – 35 с.

11. Крихівський М. В. Метод оцінювання забруднення візуального середовища міст. Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 21-22 травня 2020 року : у 2 ч. Ч. 2. Рівне : НУВГП, 2020, С. 404-407.

Referenses

1. Malovanyi M. S., Shmandii V. M., Kharlamova O. V., Cheliadyn L. I., Sakalova H. V. Analiz ta systematyzatsiia isnuiuchykh metodiv otsiniuvannya stupenia ekolohichnoi nebezpeky. *Ekolohichna bezpeka*. 2013. Vyp. 1(15). S. 37–44.

2. Sharonova N. V., Kozulia M. M. Modeliuvannya pryrodno-tekhnohennykh system ta kompleksna ekolohichna otsinka yakosti dovkillia. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv. Kh.: NTU «KhPI» 2014. № 16 (1059). S. 76 – 81.

3. Kozulia T. V., Yemelianova D. I., Kozulia M. M. Kompleksna ekolohichna otsinka pryrodno-tekhnohennykh kompleksiv na osnovi MIPS- i ryzyk-analizu. *Vostochnoevrop. zhurn. peredovykh tekhnolohiyi*. Kh., 2014. № 3 (69). S. 8–14.

4. Lysyuchenko H. V., Zabolonv Yu. L., Khmil H. A. Pryrodnyi, tekhnohennyi ta ekolohichnyi

ryzyky: analiz, otsinka, upravlinnia. *Nauk. dumka*, 2008. – 543 s.

5. Hadetska Z. M., Kuzmych N. V. Otsinka ekolohichnoho ryzyku na terytorii Ukrainy. *Efektivna ekonomika*. 2015. № 12. S. 46-54.

6. Shchodo otsinky vyklykiv natsionalni bezpetsi v ekolohichnii sferi. *Analychna zapyska Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen*. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/schodo-ocinki-viklykiv-nacionalniy-bezpeki-v-ekologichniy-sferi>

7. Obykhod H. O., Omelianenko T. L. Metodychni pidkhody shchodo otsinky rivnia ekolohichnoi nebezpeky rehioniv Ukrainy [Elektronnyi resurs] .*Efektivna ekonomika*. 2012. №10. Rezhym dostupu <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1429>

8. Bohachov S. V. Shliakhy zmitsnennia ekolohichnoi bezpeky mista [Elektronnyi resurs] *Efektivna ekonomika*. 2019. № 6. Rezhym dostupu: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2019/15.pdf

9. Vambol S. A., Koloskov V. Yu., Derkach Yu. F. Otsiniuvannya ekolohichnoho stanu terytorii, prylehlykh do mist zberihannia vidkhdov, na osnovi kryteriiu ekolohichnoho rezervu. *Tekhnogenno-ekolohichna bezpeka*. 2017. Vyp. 2. S. 67–72. - Rezhym dostupu: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/JournalTechnogenicAndEcologicalSafety/Vol-2/Vambol.-Vol-2-2017-67-72.pdf>

10. Kyryllov A. N. Metody matematycheskoho modelyrovannya dynamiky system so strukturnymy yzmenenyamy v zadachakh ekolohyy y ratsyonalnoho pryrodopolzovannya : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia dokt. fiz.-mat. nauk : 05.13.18 – teoretychni osnovy matematychnoho modelyuvannya, chyselni metody ta komplekсы proham / A. N. Kyryllov; PDU. – Petrozavodsk, 2009. – 35 p.

11. Krykivskiy M. V. Metod otsiniuvannya zabrudnennia vizualnoho seredovyscha mist. *Problemy ta perspektyvy rozvytku suchasnoi nauky* : zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii molodykh naukovtsiv, aspirantiv i zdobuvachiv vysheoi osvity, m. Rivne, 21-22 travnia 2020 roku : u 2 ch. Ch. 2. Rivne : NUVHP, 2020, p. 404-407.