

Голові спеціалізованої вченої ради  
ДФ 58.082.108  
Західноукраїнського національного  
університету  
доктору технічних наук, професору  
Диваку Миколі Петровичу

## **РЕЦЕНЗІЯ**

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри комп'ютерних наук  
Західноукраїнського національного університету

**Пукаса Андрія Васильовича**

на дисертаційну роботу Тимчишина Богдана Степановича на тему  
«Інтелектуалізована програмна система для проактивного управління  
екосистемою міста», подану на здобуття ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

### **1. Актуальність теми дисертаційного дослідження.**

Зростання рівня техногенного впливу на навколишнє середовище, що супроводжується інтенсивною урбанізацією та ускладненням енергетичних і промислових інфраструктурних об'єктів, формує гостру потребу у принципово нових підходах до забезпечення екологічної безпеки міст. Використання виключно реактивних моделей моніторингу, які функціонують за принципом констатації вже наявних фактів забруднення, повністю вичерпало свій науковий та практичний потенціал. Це зумовлено високою нелінійністю та динамічністю атмосферних процесів, специфікою щільної міської забудови, а також багатофакторністю сучасних джерел емісії.

З позиції інженерії програмного забезпечення, побудова дієвих систем екологічного менеджменту стикається зі значними архітектурними викликами. Виникає необхідність інтеграції великих масивів гетерогенних просторово-

часових даних та впровадження ресурсоемних чисельних моделей розсіювання у єдиний інформаційно-управляючий контур.

Відповідно, безальтернативним вектором розвитку є перехід до проактивних методів управління екосистемою. Цей підхід спирається на багатокритеріальне сценарне моделювання, застосування сучасних оптимізаційних алгоритмів та елементів концепції «цифрових двійників» міського середовища. Така інтелектуалізація дозволяє не лише прогнозувати екологічні наслідки при зміні конфігурації джерел техногенного навантаження, але й превентивно генерувати оптимальні просторові рішення, що робить розробку відповідних програмних систем своєчасним, науково обґрунтованим і критично необхідним кроком.

Дисертація Тимчишина Б.С. спрямована на вирішення складної задачі інженерії програмного забезпечення: створення інтелектуалізованої системи управління екосистемою урбанізованих територій. Робота є надзвичайно актуальною, оскільки інтеграція модулів обробки гетерогенних даних (метеорологічних, геопросторових) та обчислювальних модулів на основі математичних моделей прогнозування забруднення в єдиний інформаційно-управляючий контур вимагає сучасних архітектурних програмних рішень.

## **2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі**

Дисертація є цілісним науковим дослідженням із класичною структурою: анотація, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Логіка побудови рукопису повністю відповідає поставленим науково-практичним завданням.

У вступі автором розкрито актуальність проблематики, мету, завдання, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також наведено інформацію про апробацію результатів та особистий внесок здобувача.

У першому розділі здійснено критичний огляд існуючого програмного забезпечення для екологічного моніторингу (зокрема BREEZE та AERMOD

View). Доведено, що наявні монолітні системи не задовольняють вимоги проактивного управління. На основі порівняння математичних моделей розсіювання викидів обґрунтовано вибір AERMOD як базового обчислювального ядра. Також доведено необхідність використання семантичних моделей для задач проактивного управління, зокрема, оптимізації розміщення об'єктів теплогенерації.

Другий розділ, який описує інформаційне забезпечення інтелектуалізованої системи, присвячено вирішенню проблеми інтеграції гетерогенних даних на основі розроблення онтологічних описів предметної області екологічного моделювання та сценарного аналізу. Запропоновано гібридну архітектуру збору та обробки даних, де базовим елементом виступає доменна онтологія UESO, з використанням стандартів GeoSPARQL та SWEET. Також здійснено формалізацію сценаріїв моделювання.

Третій розділ присвячено розробленню математичного та алгоритмічного забезпечення інтелектуалізованої системи проактивного управління екосистемою міста. У даному розділі задачу оптимального розміщення джерел техногенного навантаження формалізовано як задачу дискретної комбінаторної оптимізації. Цільовою функцією виступає мінімізація ризиків перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, що обчислюється із використанням модуля AERMOD. За допомогою Python-фреймворку DEAP адаптовано еволюційні алгоритми та запропоновано метод автоматичного вибору стратегії пошуку залежно від складності задачі. Працездатність підходу успішно верифіковано на прикладі інфраструктури м. Тернопіль.

У четвертому розділі автор описує розроблення системи на базі сервіс-орієнтованої архітектури, в межах якої реалізовано спеціалізовані сервіси-обгортки для інтеграції консольного ядра AERMOD, що забезпечує взаємодію через стандартизовані API. Створено гібридну підсистему зберігання даних (комбінація реляційних, графових та файлових сховищ). Для забезпечення відмовостійкості та масштабованості застосовано контейнеризацію Docker з

оркестрацією в Kubernetes. Клієнтський інтерфейс реалізовано як інтерактивну ГІС-карту. Навантажувальне тестування підтвердило високу ефективність, стабільність та економію обчислювальних ресурсів у хмарному середовищі.

Висновки по роботі висвітлюють отримані результати та за своїм рівнем відповідають вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт

Додатки містять необхідні акти впровадження, що підтверджують практичну значущість дослідження.

Наукові результати є обґрунтованими завдяки коректному застосуванню методів системного аналізу, комбінаторної оптимізації та онтологічного інжинірингу. Достовірність отриманих результатів спирається на використання верифікованого модуля AERMOD та успішні обчислювальні експерименти. Робота є завершеною кваліфікаційною працею, що повністю відповідає встановленим науковим критеріям.

### **3. Наукова новизна дисертаційної роботи**

Результати дисертаційної роботи, що претендують на наукову новизну:

вперше:

- розроблено доменну онтологічну модель для інформаційного забезпечення процесів екологічного моделювання, яка, на відміну від традиційних файлових або реляційних структур, забезпечує семантичну інтеграцію гетерогенних даних міської екосистеми, що дозволило підвищити ефективність та достовірність прийняття рішень, усунувши семантичні колізії та мінімізувавши вплив людського фактору при підготовці сценаріїв моделювання;
- запропоновано адаптивний метод оптимізації розміщення джерел техногенного навантаження, який, на відміну від існуючих, базується на уніфікації програмної реалізації еволюційних операторів для різних метаевристик та здійснює керований онтологією вибір стратегії пошуку, що дозволило скоротити час пошуку рішення до прийнятних для оперативної роботи меж в умовах високої обчислювальної складності оцінки цільової функції;

- запропоновано архітектуру інтелектуалізованої системи проактивного управління екосистемою міста із застосуванням сервіс-орієнтованого підходу для оркестрації обчислювального ядра регуляторної моделі AERMOD, яка, на відміну від існуючих монолітних програмних комплексів, забезпечує повну інкапсуляцію обчислювальної логіки, слабку зв'язність компонентів та надає стандартизований програмний інтерфейс для доступу до функціоналу інтелектуалізованої системи, що забезпечує високу пропускну здатність для виконання обчислювальних процедур адаптивної оптимізації та сценарного моделювання;

набула подальшого розвитку:

- математична модель вибору локацій джерел теплогенерації, яка, на відміну від існуючих, на основі геометричних обмежень у вигляді фіксованих санітарно-захисних зон, базується на формалізації задачі як дискретної комбінаторної оптимізації з цільовою функцією, що задана алгоритмічно на основі чисельної моделі розсіювання, що дозволило здійснити пошук оптимальних рішень за критерієм мінімізації індексу забруднення у точках-рецепторах з урахуванням міської забудови.

#### **4. Дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях.**

Загальний обсяг дисертаційного дослідження складає 205 сторінок, з яких 170 сторінок відведено під основний текст. Отримані результати досліджень проілюстровано за допомогою 56 рисунків та 13 таблиць. Список використаних джерел охоплює 128 позицій наукової літератури. Додаткова інформація, яка підкріплює висновки роботи, згрупована у 3 додатках.

Дослідження написано українською мовою, дотримуючись вимог академічного стилю. Текст відзначається послідовністю викладу, точністю визначень та коректним застосуванням фахової термінології в галузі інформаційних технологій. Структура рукопису і форма висвітлення наукових результатів, висновків та пропозицій забезпечує їхнє чітке розуміння. Візуальне та структурне оформлення роботи відповідає чинним стандартам МОН України.

Експертиза на антиплагіат підтвердила значний ступінь унікальності поданого тексту. У рукописі немає неправомірних запозичень; будь-яке використання концепцій чи напрацювань інших авторів має коректні посилання на оригінальні джерела. Це засвідчує дотримання здобувачем норм академічної етики.

Основні наукові результати дисертації висвітлено у 7 друкованих працях. Серед них – 3 статті у фахових наукових виданнях та 4 публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій. Високу якість проведених досліджень засвідчує той факт, що 3 праці опубліковано в матеріалах міжнародних конференцій, які є періодичними виданнями та індексуються наукометричною базою Scopus.

### **5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Практична значущість дисертаційного дослідження полягає у створенні комплексних архітектурних рішень та розробці дієвого прототипу інтелектуалізованої системи підтримки прийняття рішень. Важливою перевагою розробленого інструментарію є його орієнтованість на спеціалістів муніципальних служб, що дозволяє їм ефективно управляти міською екосистемою без необхідності глибокого розуміння специфіки програмування чи алгоритмічної складності екологічного моделювання.

Розроблене математичне та програмне забезпечення має високу практичну цінність, оскільки забезпечує раціональний вибір локацій для нових об'єктів теплогенерації (котелень, когенераційних установок) з метою мінімізації їхнього техногенного впливу на житлові та рекреаційні зони міста. Система надає можливість оперативно та в інтерактивному режимі оцінювати екологічні наслідки процесів модернізації або перепрофілювання наявних тепломереж.

Варто відзначити, що гнучкість закладених архітектурних рішень дозволяє в перспективі масштабувати систему для інтелектуального управління іншими інноваційними об'єктами енергетики.

Достовірність та прикладна цінність результатів підтверджується їх успішною апробацією на даних мережі теплопостачання міста Тернопіль, що засвідчено відповідними актами впровадження.

## **6. Зауваження до дисертації**

Поряд із якісним виконанням дисертаційного дослідження, варто звернути увагу на окремі дискусійні питання, які виявлено в роботі:

1. У першому розділі при аналізі аналогів програмного забезпечення автор зосереджується переважно на закордонних комерційних продуктах (Lakes Environmental, BREEZE тощо). Доцільно було б детальніше розглянути вітчизняні програмні розробки в цій сфері (наприклад, ПК «ЕОЛ+», «АТМОСфера») та в чому полягає їхня архітектурна чи функціональна обмеженість для вирішення поставлених у дисертації завдань.

2. У дисертаційній роботі широко використовується узагальнений термін «екосистема міста». Враховуючи комплексний та міждисциплінарний характер цього поняття, яке охоплює біотичні, абіотичні, соціальні та економічні складові, доцільно було б на початку дослідження чітко звузити та конкретизувати його межі в рамках даної роботи, що дозволило б точніше окреслити межі відповідальності розробленого програмного забезпечення.

3. У роботі детально описано інтеграцію розрахункового ядра AERMOD, проте недостатньо уваги приділено процедурі верифікації отриманих прогнозних значень. Для більшої наочності результатів доцільно було б навести порівняння базового розрахункового сценарію з фактичними вимірюваннями на стаціонарних або мобільних постах моніторингу у м. Тернопіль.

Зроблені зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційного дослідження, а лише вказують на складність досліджуваної проблематики та можуть слугувати орієнтиром подальшої наукової роботи.

## **7. Висновки**

Дисертаційне дослідження на тему «Інтелектуалізована програмна система для проактивного управління екосистемою міста» є цілісною та завершеною

науковою працею, актуальність якої є обґрунтованою. Отримані результати характеризуються науковою новизною та практичною цінністю. Автором успішно розв'язано важливе науково-прикладне завдання – підвищення ефективності проактивного управління екосистемою міста за рахунок розроблення нових архітектурних рішень, семантичних моделей та адаптивних алгоритмів оптимізації для інтелектуалізованої програмної системи. Запропоновані підходи є вагомим внеском у розвиток галузі знань 12 «Інформаційні технології» та спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Зважаючи на безсумнівну актуальність, обґрунтованість наукової новизни, практичне значення, належну апробацію результатів та дотримання принципів академічної доброчесності, вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам нормативних документів МОН України, зокрема наказу №40 від 12.01.2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44), а її автор Тимчишин Богдан Степанович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент:

завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Західноукраїнського національного університету,  
доктор технічних наук, професор



Андрій ПУКАС

Підпис *Андрій Пукас*  
Завіряю:  
НАЧАЛЬНИК  
ЗАГАЛЬНОГО ВІДДІЛУ *Алла Селек*