

Голові разової СВР із захисту  
дисертації Вадуріна К.О.  
проф. Лактіонову І.С.  
опонента  
д. т. н., проф., Мірошник М. А.

### **ВІДГУК**

доктора технічних наук, професора, професора кафедри комп'ютерних систем та робототехніки Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, **Мірошник Марини Анатоліївни** на дисертацію **ВАДУРІНА Кирила Олеговича** на тему «Інформаційна технологія підготовки та обробки даних екологічного моніторингу на муніципальному рівні», подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

Відгук офіційного опонента, який викладено нижче, є результатом детального, всебічного та критичного аналізу змісту дисертації, наукових публікацій здобувача за темою дослідження, програмних лістингів, а також актів впровадження й використання результатів дисертаційної роботи у практичній та навчальній діяльності.

**Актуальність теми дисертаційного дослідження.** Сучасний етап розвитку глобального інформаційного суспільства та еволюції технологій Інтернету речей характеризується експоненціальним зростанням обсягів даних, що генеруються розподіленими сенсорними мережами. У контексті глобальної цифровізації, розвитку парадигми Індустрії 4.0 та безперервної розбудови екосистем «розумних міст», управління екологічною безпекою трансформується з простої процедури фіксації поточних параметрів довкілля у надскладну задачу предикативної аналітики великих даних. Посилення антропогенного тиску на урбанізовані території, незворотні кліматичні трансформації, а також жорсткі нормативні регламенти (зокрема, імплементація вимог Європейського зеленого курсу та Директиви ЄС 2024/2881) вимагають від органів місцевого самоврядування та муніципалітетів впровадження інтелектуальних інформаційних систем, здатних не лише констатувати факт забруднення постфактум, але й з високою точністю прогнозувати його динаміку, виявляти просторово-часові аномалії та автоматично формувати управлінські рекомендації для запобігання екологічним кризам.

Незважаючи на стрімкий розвиток апаратних засобів, на рівні алгоритмічного та програмного забезпечення систем муніципального моніторингу залишається низка критичних та відкритих питань. По-перше, існуючі IT-рішення відзначаються високою архітектурною фрагментарністю: модулі збору даних (які часто базуються на закритих пропрієтарних протоколах), аналітичні ядра та геоінформаційні системи функціонують розрізнено, що унеможливорює створення єдиного наскрізного конвеєра обробки даних. По-друге, виникає гостра науково-практична проблема «сліпих зон» через

просторову розрідженість фізичних станцій спостереження, що обмежує можливості локалізації джерел емісії. По-третє, класичні статистичні моделі та традиційні глибокі нейронні мережі виявляються неефективними при роботі в умовах «малих вибірок» даних, високої волатильності та стохастичних інцидентів, що є типовим для локальних муніципальних систем на початковому етапі їх розгортання. Додатковою перешкодою є обмеженість обчислювальних та енергетичних ресурсів кінцевих IoT-вузлів, що ускладнює реалізацію надійних криптографічних протоколів для захисту екологічної інформації.

З огляду на ці фактори, тема дисертаційного дослідження Вадуріна Кирила Олеговича, яка присвячена розробці комплексної інформаційної технології підготовки та обробки даних екологічного моніторингу, що поєднує оптимізовані легковагові IoT-протоколи, алгоритми просторової інтерполяції, квантово-гібридні нейромережі та мультимодальних когнітивних агентів, є надзвичайно актуальною, своєчасною та затребуваною як у науковому, так і в практичному вимірах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження Вадуріна К.О. повною мірою корелює із загальнодержавними пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», Постанови КМУ № 476 та № 827). Робота є невіддільною складовою частиною планових науково-дослідних робіт Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського та виробничих проєктів Комунального підприємства «Науковий центр еколого-соціальних досліджень» (м. Кременчук), спрямованих на розробку інтелектуальних систем моніторингу довкілля та забезпечення цифровізації процесів муніципального управління.

Зокрема, основні наукові положення та практичні результати дисертації було розроблено в межах виконання державних науково-дослідних робіт (НДР): «Програмно-апаратне рішення інформаційної системи екологічного моніторингу для забруднення-орієнтованого керування» (№ держреєстрації 0124U004830), «Інформаційна модель системи керування кластером забруднення-орієнтованих пристроїв» (№ держреєстрації 0124U004831), а також госпдоговірних тем № 0123U105056, № 0123U105054 та № 0123U105055.

**Особистий внесок здобувача** у виконання зазначених наукових програм полягає у самостійному розробленні концептуальної архітектури та функціоналу прогнозної інформаційної системи, формалізації математичного забезпечення розширеної моделі DPPDMext, програмній реалізації алгоритмів геопросторової симуляції віртуальних станцій, а також у створенні, навчанні та тестуванні інноваційних квантово-гібридних прогностичних моделей та автономних когнітивних LLM-агентів для автоматизації аналізу якості прогнозів і формування управлінських рішень.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Високий ступінь обґрунтованості, достовірності та об'єктивності наукових положень, результатів і висновків, сформульованих у дисертації, забезпечується коректним застосуванням фундаментальних положень системного аналізу, теорії

ймовірностей, математичної статистики, сучасних методів машинного та глибокого навчання, векторного числення, об'єктно-орієнтованого програмування, а також основ квантової інформатики (симуляції за допомогою бібліотеки PennyLane).

Працездатність і дієвість розроблених методів (зокрема, зворотно-зваженої інтерполяції IDW, алгоритмів просторової кластеризації K-Means, автокореляційного аналізу та тестів Дікі-Фуллера) доведено на надзвичайно великих і репрезентативних масивах емпіричних даних: використано понад 1,5 мільйона записів з розподіленої мережі Eco-City та понад 500 тисяч комплексних записів зі спеціалізованих станцій Vaisala AQT420. Висока збіжність результатів квантово-гібридного моделювання з реальними фізичними процесами накопичення та розсіювання забруднювачів, а також успішна дослідна експлуатація створеного програмного комплексу (на базі Laravel, Vue.js, Python, R Shiny) у реальних умовах муніципалітету безперечно підтверджують достовірність та відтворюваність наукових результатів дисертації.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна дисертаційної роботи Вадуріна К.О. полягає у створенні цілісної архітектури та алгоритмічного забезпечення для систем екологічного моніторингу шляхом синергетичного поєднання методів геопросторового аналізу, квантово-інспірованих алгоритмів машинного навчання та когнітивних технологій штучного інтелекту. До найбільш вагомих результатів, що становлять наукову новизну та виносяться на захист, належать такі:

1. **Уперше синтезовано** розширену концептуальну модель підготовки та обробки даних екологічного моніторингу DPPDMext за рахунок інтеграції блоку геопросторового моделювання віртуальних станцій і блоку адаптивної переоцінки моделей безпосередньо до складу ітераційного аналітичного конвеєра. На відміну від відомих концептуальних базових моделей спостереження, це забезпечує врахування просторової неповноти моніторингових даних у процесі обробки та дозволяє суттєво зменшити негативний вплив інформаційної розрідженості муніципальних мереж на кінцевий результат.

2. **Удосконалено** метод просторового аналізу та моделювання полів екологічного забруднення шляхом алгоритмічного синтезу паралельних часових рядів цільової та динамічної фонові точок спостереження на основі часово-ітеративної зворотно-зваженої інтерполяції та моделей антропогенного навантаження. На відміну від відомих підходів статичної геоінформаційної візуалізації, розроблений метод додатково інтегрує процедуру автоматизованої перевірки статистичних гіпотез про наявність неврахованих джерел емісії, що дало змогу підвищити точність ідентифікації локальних зон екологічного ризику на територіях з відсутністю фізичних сенсорів.

3. **Удосконалено** метод прогнозування екологічних та метеорологічних параметрів стану атмосферного повітря (температури, вологості, концентрацій CO, NO<sub>2</sub>, дрібнодисперсного пилу) за рахунок гібридизації алгоритмів глибокого навчання з математичним апаратом варіаційних квантових схем. На відміну від базових рекурентних нейронних мереж та авторегресійних алгоритмів,

інтеграція квантових шарів у рекурентні структури та відображення вектора ознак у квантовий простір станів забезпечує, в умовах обмежених вибірок даних, зниження середньоквадратичної помилки моделювання на 45–74 % та гарантує загальну точність прогнозування на рівні не менше ніж 97 %.

4. **Удосконалено** теоретико-прикладні засади та метод інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень на базі обробки даних екологічного моніторингу за рахунок розроблення автономного когнітивного мультимодального агента. На відміну від існуючих підходів, що базуються на простих статистичних тригерах, агент реалізує архітектурний цикл «планування-виконання-синтез» з використанням технології RAG, що поєднує автоматизоване оцінювання надійності прогнозів, інтерпретацію комплексних екологічних ризиків і генерування структурованих вербальних планів реагування для муніципальних служб.

**Практична цінність, використання та впровадження одержаних результатів.** Запропоновані здобувачем моделі, алгоритми та архітектурні рішення забезпечують вагомий практичний ефект для органів місцевого самоврядування, надаючи потужний інструмент для реалізації концепції Smart City та перетворюючи розрізнені масиви даних на структурований інструмент стратегічного планування.

У частині програмно-апаратного забезпечення розроблено та реалізовано комплексний вебдодаток на базі стеку Laravel, MySQL, Vue.js та аналітичної платформи R Shiny, що забезпечує високошвидкісну обробку даних за принципом SPA. Створено модулі для периферійних шлюзів на базі мікроконтролерів ESP32, які використовують легковаговий протокол LwM2M з моделлю контролю доступу ABAC, а також алгоритми Isolation Forest та Autoencoders для детектування мережевих аномалій.

Практична значимість підтверджується відповідними актами про впровадження у виробничу та навчальну діяльність:

1. Комунальне підприємство «Науковий центр еколого-соціальних досліджень» (м. Кременчук) впровадило розроблені програмно-апаратні рішення для інтелектуального збору даних з метеостанцій Lufft WS600 та газоаналізаторів ПМЕЛ, а також модуль автоматизованого формування нормативної звітності (відповідно до Постанови КМУ №827), що дозволило скоротити час підготовки регламентних документів з 4 годин до 30 хвилин.

2. Товариство з обмеженою відповідальністю «ЛЕМПДЕВ» (м. Кременчук) використало методологію проектування на основі моделі DPPDMext, алгоритми динамічного контролю доступу ABAC та адаптований стек LwM2M при розробці спеціалізованих систем екологічного моніторингу. Децентралізована архітектура збору даних забезпечила пряму економію понад 90% муніципальних бюджетних коштів на розгортання порівняно з пропріетарними хмарними рішеннями (прямий економічний ефект склав понад 29 тис. грн на рік для пілотної зони).

3. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського впровадив теоретичні положення моделі DPPDMext та математичний апарат квантово-гібридного прогнозування у навчальний процес при підготовці бакалаврів та магістрів спеціальності 123 «Комп'ютерна

інженерія» (дисципліни «Проектування систем моніторингу», «Технології Інтернету речей»).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота характеризується логічною, стрункою та збалансованою структурою. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел (134 найменування) та 3 додатків (з переліком публікацій, актами впровадження та фрагментами розробленого програмного коду). Загальний обсяг дисертації становить 215 сторінок, з яких основний текст викладено на 137 сторінках. Робота ілюструється 20 рисунками та підкріплюється 22 таблицями. Структура та обсяг дисертації повністю відповідають чинним вимогам та нормам МОН України.

**Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях.** За темою дисертаційного дослідження здобувачем Вадуріним К.О. одноосібно та у співавторстві опубліковано 21 наукову працю. Серед них: 2 статті у провідних закордонних періодичних виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus (журнали квінтилів Q1-Q2); 6 статей у фахових наукових виданнях України категорії «Б» (5 з яких безпосередньо за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»); 3 статті у матеріалах міжнародних конференцій (індексуються в Scopus), та 10 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях. Кількість і зміст опублікованих праць повною мірою відповідають актуальним вимогам пп. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, що дозволяє стверджувати про повне і вичерпне висвітлення наукових результатів дисертації у відкритому доступі.

**Оцінка змісту дисертації та дотримання принципів академічної доброчесності.** Дисертаційна робота написана державною мовою з дотриманням чіткого наукового стилю, широким та коректним використанням сучасної технічної термінології. Синтаксичні конструкції побудовані грамотно; стилістичних чи граматичних хиб не виявлено. За своїм змістовним наповненням дисертація здобувача повністю відповідає Освітньо-науковій програмі зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

На підставі перевірки дисертаційної роботи на плагіат, можна зробити беззаперечний висновок, що дисертація Вадуріна К.О. є результатом самостійних і оригінальних наукових досліджень. Робота не містить жодних ознак фабрикації чи фальсифікації експериментальних даних, оскільки спирається на реальні верифіковані масиви сенсорних мереж, та текстових запозичень без відповідних посилань. Значна частка посилань представляє найсучасніші англійські статті за 2020-2025 роки з провідних світових баз даних.

**Мова та стиль викладання результатів.** Мова та стиль викладання результатів. Дисертаційна робота підготовлена державною мовою. Стиль викладення матеріалу є структурованим, логічним і лаконічним. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 134 найменувань та 3 додатків.

*Аналіз змістовного наповнення дисертації.* У Вступі переконливо обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, ключові завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження. Чітко викладено наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів.

Перший розділ присвячено глибокому системному аналізу сучасного стану проблеми муніципального екологічного моніторингу. Автор детально розглядає еволюцію математичних моделей (від моделей лагранжевого типу HYSPLIT до сучасних архітектур Transformer та цифрових двійників). Увагу зосереджено на критичному аналізі системних обмежень важких веб-протоколів у ресурс-обмежених IoT-мережах та проблеми перенавчання класичних глибоких нейромереж на «малих вибірках», що формує ідеальну доказову базу для постановки завдань власного дослідження.

У другому розділі закладено основний теоретико-математичний фундамент розробленої інформаційної технології. Здобувач формалізує концептуальну розширену модель DPPDMext у вигляді логічного кортежу множин. Детально описується математичний апарат зворотно-зваженої інтерполяції для створення віртуальних станцій, що дозволяє закривати інформаційні «сліпі плями». Крім того, автор пропонує оригінальну архітектуру корпоративної IoT-мережі, обґрунтовує вибір протоколу LwM2M та формалізує задачу цілочисельного лінійного програмування для мінімізації витрат на розміщення сенсорів із забезпеченням суворої моделі динамічного управління доступом ABAC.

Третій розділ становить алгоритмічне та інтелектуальне серце системи. Автор формалізує п'ятикрокову процедуру попереднього автоматичного аналізу часових рядів (з використанням спектрального аналізу FFT). Найвагомим науковим здобутком розділу є розробка квантово-гібридних прогностичних моделей, де класичні дані кодуються у квантові стани через варіаційні схеми, що елегантно розв'язує проблему «прокляття розмірності» на коротких часових інтервалах. Розділ завершується розробкою алгоритму для автономного когнітивного LLM-агента, який генерує зрозумілі експертні висновки на основі обчислення інтегральних індексів ризику.

Четвертий розділ містить вичерпну інформацію щодо архітектурної програмно-технічної реалізації та глибокої експериментальної апробації системи. Описано розроблений стек технологій. Масштабна валідація на реальних даних з Кременчуцької агломерації довела беззаперечну перевагу квантово-гібридних алгоритмів. Показовим є практичний кейс виявлення прихованого джерела викидів формальдегіду на Крюківському мосту за допомогою імітаційної моделі віртуальної станції. Розділ логічно завершується детальним техніко-економічним обґрунтуванням, що кількісно доводить рентабельність масштабування розробленої технології. Загальні висновки повністю узгоджуються з поставленими завданнями.

Загальні висновки дисертації є лаконічними та відображають результати досягнення поставлених на початку роботи завдань.

У додатках до роботи подано скан-копії актів впровадження у роботу підприємств та фрагменти розробленого програмного коду.

**Зауваження, коментарі та дискусійні положення щодо змісту дисертації.** Під час детального вивчення матеріалів дисертаційної роботи Вадуріна К.О., високо оцінюючи її наукову новизну та практичну значущість, як офіційний опонент вважаю за необхідне висловити наступні зауваження та дискусійні положення:

1. У другому розділі під час проектування архітектури системи автор зосереджує увагу на передачі телеметричних даних до центрального сервера для їхньої подальшої предикативної обробки. Проте, зважаючи на сучасний розвиток концепції граничних обчислень, було б доцільно розглянути можливість перенесення частини легких алгоритмів (наприклад, первинної фільтрації апаратних аномалій) безпосередньо на рівень мережевих шлюзів для підвищення загальної автономності системи.

2. Розроблена інформаційна технологія орієнтована переважно на стаціонарні IoT-пости та алгоритмічне створення «віртуальних» станцій. Враховуючи специфіку екологічного моніторингу, робота значно б виграла, якби автор передбачив або окреслив архітектурні механізми інтеграції мобільних робототехнічних комплексів (наприклад, екологічних дронів-газоаналізаторів) як динамічних вузлів збору просторових даних.

3. У четвертому розділі наведено результати стрес-тестування мережі за умов втрати пакетів. Однак недостатньо висвітлено питання системної відмовостійкості: як саме розроблена технологія реагує на тривалу втрату зв'язку з центральним оркестратором та чи передбачено механізми локального збереження і буферизації зібраних даних на периферії до моменту відновлення каналу.

4. Для накопичення даних муніципального моніторингу автор використовує реляційну базу даних MySQL. Хоча такий вибір дозволяє зручно інтегрувати дані з веб-фреймворком Laravel, для обробки високочастотних часових рядів від десятків або сотень IoT-сенсорів у перспективі доцільнішим є використання спеціалізованих баз даних часових рядів.

5. Модель підготовки даних детально описує етапи очищення та алгоритмічного заповнення пропусків. Разом з тим, поза увагою залишився такий важливий для апаратних екологічних систем аспект, як автоматична компенсація апаратного дрейфу сенсорів (деградації чутливості електрохімічних датчиків з часом), що в довгостроковій перспективі може негативно впливати на точність квантово-гібридних прогнозів.

Вищезазначені зауваження, коментарі та дискусійні положення жодним чином не знижують загальної позитивної оцінки дисертації Вадуріна К.О., а лише можуть слугувати предметом наукової дискусії під час захисту.

**Загальний висновок щодо дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота здобувача Вадуріна Кирила Олеговича на тему «Інформаційна технологія підготовки та обробки даних екологічного моніторингу на муніципальному рівні» є оригінальним, самостійним та повністю завершеним науково-прикладним дослідженням. У роботі успішно розв'язано важливу науково-прикладну задачу створення цілісної вискоефективної інформаційної технології, здатної на базі гібридних алгоритмів штучного інтелекту, квантових

обчислень та легковагових IoT-протоколів автоматизувати весь цикл екологічної аналітики муніципалітетів від захищеного збору даних до синтезу управлінських рішень.

За рівнем наукової новизни, актуальністю теми, обсягом проведених досліджень, практичною цінністю отриманих результатів, а також кількістю та якістю публікацій, дисертація повністю відповідає вимогам, що передбачені Порядком підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Вважаю, що здобувач Вадурін Кирило Олегович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

#### **Опонент**

професор кафедри комп'ютерних систем  
та робототехніки Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна,  
доктор технічних наук, професор

Марина МІРОШНИК