

Голові разової спеціалізованої вченої ради із захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії
Вадуріна К.О.
проф. Лактіонову І.С.
рецензента
д. т. н., проф., Швачича Г. Г.

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора, професора кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» **ШВАЧИЧА Геннадія Григоровича** 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 рецензента, який викладено нижче, є результатом детального аналізу змісту дисертації, наукових публікацій здобувача за темою дослідження, а також програмних лістингів та актів впровадження результатів роботи.

Актуальність теми дисертаційного дослідження. В епоху стрімкої урбанізації та розвитку концепції «Smart City» управління екологічною безпекою вимагає переходу від систем простої реєстрації даних до складних програмно-аналітичних комплексів. Сучасні муніципальні системи стикаються з проблемою обробки великих масивів гетерогенних даних, отриманих від розподілених мереж Інтернету речей. При цьому виникає критична потреба у створенні надійного програмного забезпечення, здатного функціонувати в умовах обмежених обчислювальних ресурсів периферійних пристроїв та розрідженості сенсорних мереж.

Дисертація Вадуріна К.О. спрямована на розв'язання гострої науково-прикладної проблеми: подолання архітектурної фрагментарності існуючих екологічних ІТ-систем та підвищення точності предикативної аналітики в умовах «малих вибірок». Запропонований автором підхід, що поєднує оптимізовані IoT-протоколи, алгоритми просторової інтерполяції, квантово-гібридні нейромережі та мультимодальних когнітивних агентів, є актуальним завданням для сучасної галузі комп'ютерних наук та програмної інженерії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження цілком відповідає пріоритетним напрямкам розвитку інформаційних технологій в Україні. Робота є складовою частиною планових науково-дослідних робіт Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського та КП «Науковий центр еколого-соціальних

досліджень». Зокрема, результати розроблено в межах НДР: «Програмно-апаратне рішення інформаційної системи екологічного моніторингу для забруднення-орієнтованого керування» (№ держреєстрації 0124U004830), «Інформаційна модель системи керування кластером забруднення-орієнтованих пристроїв» (№ держреєстрації 0124U004831) та ін.

Особистий внесок здобувача у виконання зазначених науково-дослідних робіт полягає у самостійному розробленні теоретичних засад та алгоритмічного забезпечення моделі DPPDMext, проектуванні архітектури захищеної IoT-мережі, а також розробці та програмній реалізації квантово-гібридних моделей прогнозування і автономних когнітивних агентів.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Обґрунтованість результатів базується на використанні сучасного математичного апарату та передових методів розробки програмного забезпечення. Здобувачем використано методи системного аналізу, об'єктно-орієнтованого програмування, глибокого машинного навчання (у т.ч. квантові симуляції за допомогою бібліотеки PennyLane) та просторової інтерполяції. Достовірність алгоритмів доведена їх успішним тестуванням на репрезентативних масивах реальних даних (понад 1,5 мільйона записів з мереж Eco-City та станцій Vaisala AQT420). Працездатність розробленої ІТ підтверджена програмною реалізацією за допомогою стеку технологій Laravel, Vue.js, Python, R Shiny та успішною дослідною експлуатацією.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертації Вадуріна К.О. полягає у створенні цілісної архітектури та алгоритмічного забезпечення для систем екологічного моніторингу. Серед найвагоміших результатів варто відзначити:

– *уперше запропоновано* розширену концептуальну модель підготовки та обробки даних екологічного моніторингу DPPDMext, яка, на відміну від існуючих базових моделей спостереження, інтегрує блок геопросторового моделювання віртуальних станцій та блок адаптивної переоцінки моделей безпосередньо в ітераційний аналітичний конвеєр, що дозволяє усунути інформаційну розрідженість муніципальних мереж моніторингу;

– *удосконалено* метод просторового аналізу та моделювання полів екологічного забруднення шляхом алгоритмічного синтезу паралельних часових рядів цільової та динамічної фонові точок спостереження на основі часовоїтеративної зворотно-зваженої інтерполяції та моделей антропогенного навантаження, який, на відміну від відомих підходів статичної геоінформаційної візуалізації, додатково інтегрує процедуру автоматизованої перевірки статистичних гіпотез про наявність неврахованих джерел емісії, що дало змогу підвищити точність локалізації локальних зон екологічного ризику на територіях з недостатнім покриттям фізичними засобами вимірювання;

– *удосконалено* метод прогнозування екологічних та метеорологічних параметрів стану атмосферного повітря, зокрема температури, відносної

вологості, атмосферного тиску, концентрацій оксиду вуглецю, діоксиду азоту та дрібнодисперсного пилу, шляхом гібридизації алгоритмів глибокого навчання з математичним апаратом варіаційних квантових схем, що, на відміну від базових рекурентних нейронних мереж та авторегресійних алгоритмів, за рахунок процедури адаптивного вибору моделі та відображення вектора ознак у квантовий простір станів дало змогу знизити середньоквадратичну похибку моделювання на 45–74 відсотки та забезпечити загальну точність прогнозування на рівні понад 97 відсотків в умовах обмежених історичних вибірок даних;

– *удосконалено* метод інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень в екологічних інформаційних системах, який, на відміну від відомих підходів на основі статистичних тригерів або дескриптивної візуалізації, базується на використанні мультимодального автономного нейромережевого агента з інтеграцією візуально-мовних та великих мовних моделей за когнітивною архітектурою планування-виконання-синтез і технологією векторного пошуку, що дозволило забезпечити автоматизовану когнітивну інтерпретацію складних багатовимірних масивів даних для їхньої швидкої трансформації у структуровані вербальні плани реагування муніципальних служб.

Практична цінність одержаних результатів. Запропоновані в дисертації моделі, методи та алгоритми забезпечують вагомий практичний ефект для органів місцевого самоврядування, перетворюючи розрізнені масиви екологічних даних на структурований інструмент оперативного реагування та стратегічного планування.

1. У частині методичного забезпечення розроблено алгоритмічний та структурно-компонентний апарат для розширеної моделі моніторингу, процедури адаптивного вибору предикативних моделей на основі метрик точності, а також методику автоматизованого розрахунку комплексного інтегрального індексу екологічного ризику. Створено інструментарій віртуальних прогнозних станцій для виявлення локальних викидів формальдегіду та оксиду вуглецю в емісійно-навантажених точках інфраструктури.

2. У частині програмно-апаратного забезпечення розроблено та впроваджено комплексний вебдодаток на базі фреймворку Laravel та аналітичної платформи R Shiny для інтелектуального збору, обробки та візуалізації екологічних даних. Реалізовано модуль автоматизованого формування звітності про кількість перевищень встановлених нормативів ГДК маркерів атмосферного повітря. Розроблено архітектуру захищеної периферійної мережі з використанням мікроконтролерів ESP32 та протоколу LwM2M з моделлю доступу ABAC.

3. Отримано значний економічний та технічний ефект від впровадження розроблених рішень. Автоматизація формування звітності згідно з Постановою № 827 КМУ дозволила скоротити час підготовки регламентних документів з 4 годин до 30 хвилин. Запропонована децентралізована архітектура збору даних забезпечує економію понад 90% бюджетних коштів на розгортання та

обслуговування мережі (пряма економія близько 29,95 тис. грн на рік для пілотної зони) порівняно з використанням закритих пропрієтарних хмарних рішень. Впровадження легковагових протоколів радикально знизило навантаження на канали зв'язку та оперативну пам'ять сенсорних вузлів.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота характеризується логічною та збалансованою структурою. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 215 сторінок. Основний текст викладено на 137 сторінках, він ілюструється 20 рисунками та підкріплюється 22 таблицями. Список використаних джерел налічує 134 найменувань. Структура та обсяг цієї дисертації відповідають чинним вимогам та нормам.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях. За темою дисертаційного дослідження здобувачем опубліковано 21 наукову працю. Серед них: 2 статті у провідних періодичних закордонних виданнях, що проіндексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus (у тому числі журнали квінтилів Q1-Q2); 6 статей у періодичних наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б (5 з яких за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»); 3 статті у матеріалах міжнародних конференцій, що також індексуються наукометричною базою Scopus; 10 публікацій апробаційного характеру у збірниках тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях у закладах освіти Києва, Харкова, Дніпра, Кременчука.

Кількість та зміст опублікованих праць 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, а також дають підстави вважати, що основні науково-прикладні результати дисертаційної роботи, які опубліковано в періодичних наукових виданнях, охоплюють усі наукові положення, що виносяться на захист.

Упровадження та використання результатів дисертаційного дослідження. Практична значимість та дієздатність розробленої інформаційної технології підтверджується відповідними актами про впровадження у виробничу та навчальну діяльність таких установ:

– комунальне підприємство «Науковий центр еколого-соціальних досліджень» (м. Кременчук) впровадило у свою виробничу діяльність розроблені програмно-апаратні рішення для автоматизації процесів збору, захищеної передачі та обробки даних з газоаналізаторів ПМЕЛ та метеостанцій Lufft WS600, а також модуль генерації звітності за вимогами постанови КМУ №827. Це дозволило оптимізувати витрати підприємства та забезпечити органи місцевого самоврядування достовірною предикативною інформацією;

– товариство з обмеженою відповідальністю «ЛЕМПДЕВ» використало методологію проектування сучасних інформаційних технологій на базі моделі DPPDMext, алгоритми динамічного контролю доступу АВАС та рішення з адаптації протоколу LwM2M при розробці та адмініструванні спеціалізованих систем екологічного спрямування для муніципальних замовників;

– Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського впровадив результати дисертаційної роботи, зокрема концептуальні положення моделі DPPDMext та математичний апарат квантово-гібридного прогнозування, у навчальний процес під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» у межах викладання дисциплін «Проектування систем моніторингу», «Технології Інтернету речей» та «Кіберфізичні системи».

Оцінка змісту дисертації, її завершеності, відповідності встановленим вимогам та дотримання принципів академічної доброчесності. За своїм змістовним наповненням дисертація здобувача Вадуріна К.О. повністю відповідає ОНП спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» НТУ «Дніпровська політехніка» та стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти. На підставі перевірки дисертаційної роботи на плагіат, можна зробити висновок, що дисертація Вадуріна К.О. є результатом самостійних і оригінальних досліджень та не містить елементів фабрикації, фальсифікації, плагіату та текстових запозичень. Дисертація спирається на 134 літературні джерела, значна частка яких представляє сучасні англійські статті (2020-2025 років) з провідних світових баз даних. Коректність цитування витримана на всьому масиві тексту: автор вказує посилання на результати інших дослідників. Робота не містить ознак фабрикації, фальсифікації експериментальних даних (оскільки спирається на реальні масиви сенсорних мереж) чи академічного плагіату.

Мова та стиль викладання результатів. Дисертаційна робота написана державною мовою. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 134 найменування та 3 додатків. Стиль викладення матеріалу є чітким, логічним і лаконічним. Дисертація написана за об'єктивно побудованим планом та характеризується чіткою структурою.

Аналіз змістовного наповнення дисертації. У вступі автор переконливо обґрунтовує актуальність обраної теми, формулює мету, ключові дослідницькі завдання, визначає об'єкт і предмет дослідження, описує застосовані методи. Тут також структуровано викладено наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів, наведено дані щодо їхньої апробації.

Перший розділ присвячено системному аналізу сучасного стану проблеми муніципального екологічного моніторингу. Здобувач розглядає існуючі концептуальні підходи, аналізує інструментальну базу ГІС-технологій та еволюцію математичних моделей. Увагу зосереджено на критичному аналізі

системних обмежень IoT-мереж та проблеми «малих вибірок» у предикативній аналітиці. У результаті проведеного аналізу автор доводить архітектурну фрагментарність наявних рішень, що слугує ідеальним логічним містком до формулювання завдань власного дослідження.

Другий розділ розкриває теоретичні та концептуальні засади розробленої інформаційної технології. У цьому розділі автор формалізує розширену модель підготовки та обробки даних DPPDMext у вигляді логічного кортежу множин. Детально описано математичне забезпечення блоку геопросторового моделювання. Крім того, автор пропонує аналітичну модель корпоративної IoT-мережі, обґрунтовуючи вибір архітектури та стандартів зв'язку, а також розробляє строгу цілочисельну оптимізаційну модель для оцінки кіберризиків та розміщення сенсорів на базі легковагового протоколу LwM2M з використанням логіки ABAC.

У третьому розділі викладено алгоритмічне серце системи – комп'ютерно-орієнтовані методи прогнозування та інтелектуального аналізу. Здобувач деталізує п'ятикрокову процедуру попереднього аналізу часових рядів (з використанням критеріїв стаціонарності та автокореляції) та розробляє процедуру адаптивної селекції моделей прогнозування на основі метрик якості. Центральним елементом розділу є математична формалізація квантово-гібридного фреймворку, який долає проблему перенавчання на малих вибірках завдяки використанню варіаційних квантових схем. Розділ логічно завершується описом архітектури автономних когнітивних агентів на базі великих мовних моделей, які здатні розраховувати інтегральні індекси надійності та ризику, генеруючи вербальні управлінські рекомендації.

Четвертий розділ містить вичерпну інформацію щодо програмно-технічної реалізації та всебічної експериментальної перевірки запропонованих рішень. Автор детально описує архітектуру розробленого вебкомплексу на базі технологій Laravel, Vue.js, MySQL та R Shiny. Наведено результати апробації на реальних даних Кременчуцької агломерації, де квантово-гібридні моделі продемонстрували суттєве зниження похибки прогнозування складних забруднювачів порівняно з класичними статистичними методами. Валідовано концепцію віртуальних станцій на прикладі транспортних розв'язок міста. Завершується розділ техніко-економічним обґрунтуванням, яке кількісно доводить рентабельність та ефективність масштабування розробленої технології.

Загальні висновки дисертації є чіткими, лаконічними та повністю корелюють із поставленими на початку роботи завданнями. Додатки містять корисний довідковий матеріал, включаючи списки публікацій, скан-копії актів впровадження та фрагменти розробленого програмного коду.

Зауваження, коментарі та дискусійні положення щодо змісту дисертації. У результаті детального аналізу дисертаційної роботи Вадуріна К. О. встановлено, що дослідження виконано на високому науковому рівні. Водночас окремі положення дисертації мають дискусійний характер або потребують додаткового обґрунтування, а саме:

1. У третьому розділі дисертації запропоновано використання квантово-гібридних моделей для обробки екологічних часових рядів. Разом із тим, доцільним було б більш ґрунтовно проаналізувати вплив квантового шуму та явищ декогеренції, характерних для реальних фізичних квантових процесорів (QPU), на точність і довгострокову стабільність прогнозування. Такий аналіз є важливим з огляду на те, що моделювання квантових станів на класичних обчислювальних платформах, як правило, здійснюється в ідеалізованих умовах і не повною мірою відображає особливості функціонування реального квантового обладнання.

2. Обґрунтовуючи алгоритми підсистеми геопросторового моделювання, автор застосовує 10-відсотковий поріг просторової фільтрації фонових точок для визначення безпечних зон. Водночас у роботі недостатньо висвітлено питання чутливості запропонованого критерію. Зокрема, доцільно було б оцінити, яким чином зміна порогового значення, наприклад до 5 % або 15 %, могла б вплинути на результати роботи системи та сформовані рекомендації щодо розміщення станцій моніторингу.

3. Під час формалізації моделі безпеки сенсорного рівня на основі протоколу LwM2M із використанням моделі керування доступом АВАС автором запропоновано алгоритм безпечної ініціалізації пристроїв. Разом із тим, наукову цінність отриманих результатів посилило б наведення кількісного порівняння запропонованого підходу із сучасними архітектурами нульової довіри за такими показниками, як обчислювальні витрати, обсяг службового трафіку та енергоспоживання, що є особливо актуальним для екосистем граничних обчислень Інтернету речей.

4. Експериментальна апробація розробленої інформаційної технології, представлена у четвертому розділі, здійснювалася на даних Кременчуцької агломерації. Незважаючи на репрезентативність і достатній обсяг використаної вибірки, додаткове тестування запропонованих квантово-гібридних моделей і когнітивних агентів на даних міст із відмінними кліматичними, географічними чи індустріальними характеристиками (зокрема високогірних або приморських територій) сприяло б більш повному підтвердженню універсальності запропонованого підходу та розширенню меж його практичного застосування.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Вадуріна Кирила Олеговича на тему «Інформаційна технологія підготовки та обробки даних екологічного моніторингу на муніципальному рівні» є самостійним, оригінальним і логічно завершеним науковим дослідженням. У роботі успішно розв'язано важливу науково-прикладну задачу створення комплексних моделей, методів та інтелектуальних інформаційних технологій, що забезпечують захищений збір, прогнозування та автоматизовану підтримку прийняття управлінських рішень у сфері екологічної безпеки міст.

За рівнем наукової новизни, 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».

Рецензент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри програмного
забезпечення комп'ютерних систем
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»

Геннадій ШВАЧИЧ