

Голові разової СВР із захисту
дисертації Вадуріна К.О.
проф. Лактіонову І.С.
рецензента
доц. Дяченка Г.Г.

ВІДГУК

рецензента, кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» ДЯЧЕНКА Григорія Григорійовича 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 критичного аналізу змісту дисертації, наукових публікацій здобувача за темою дисертації, а також актів впровадження й використання результатів дисертаційної роботи.

Актуальність теми дисертаційного дослідження. Сучасний етап еволюції інформаційних технологій характеризується експоненціальним зростанням обсягів даних, що генеруються розподіленими мережами Інтернету речей. У контексті глобальної цифровізації та розбудови екосистем «розумних міст», завдання екологічного моніторингу трансформується з простої фіксації поточних параметрів довкілля у складну задачу предикативної аналітики великих даних. Посилення антропогенного тиску на урбанізовані території, кліматичні трансформації та жорсткі нормативні регламенти (зокрема, Директива ЄС 2024/2881) вимагають від муніципалітетів впровадження інтелектуальних систем, здатних не лише констатувати факт забруднення, але й прогнозувати його динаміку, виявляти 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 відкритих питань. По-перше, існуючі рішення відзначаються високою архітектурною фрагментарністю: модулі збору даних (часто базуються на закритих пропрієтарних протоколах), аналітичні ядра та геоінформаційні системи функціонують розрізнено. По-друге, виникає гостра проблема «сліпих зон» через просторову розрідженість фізичних станцій спостереження. 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 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 відповідає найсучаснішим тенденціям цифровізації муніципалітетів та присвячена розробці комплексної інформаційної технології підготовки та обробки даних екологічного моніторингу. Таким чином, вважаю, що в сьогodenних умовах тема є актуальною та своєчасною. Об'єктивна необхідність у розв'язанні поставленої науково-прикладної задачі полягає у створенні єдиного інтелектуального конвеєра, який інтегрує захищений збір даних через легковагові протоколи, просторове моделювання віртуальних станцій, квантово-гібридні алгоритми машинного навчання та когнітивних агентів. Такий підхід здатний якісно змінити парадигму муніципального управління, забезпечивши перехід до проактивного реагування на екологічні ризики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження 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 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 було розроблено та впроваджено у межах виконання таких 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 НДР № 0123U105056, № 0123U105054 та № 0123U105055. Окремі елементи дослідження були реалізовані під час виконання госпрозрахункових тем.

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

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових результатів та висновків, сформульованих у дисертації. Сформульовані в дисертаційній роботі наукові результати та висновки повною мірою відповідають установленим вимогам до досліджень відповідного рівня. Автор чітко визначив мету, об'єкт та предмет дослідження, що дозволило сформулювати чітку логіку наукового пошуку. Здобувачем здійснено вичерпний аналіз сучасних підходів до моделювання природних процесів (від моделей лагранжевого типу HYSPLIT до сучасних архітектур Transformer та концепцій цифрових двійників). Коректна постановка завдань дозволила автору синтезувати унікальну розширену концептуальну

модель DPPDMext, що об'єднує етапи екстракції даних, автоматичної селекції моделей, геопросторової інтерполяції та когнітивної обробки результатів.

Високий ступінь обґрунтованості, достовірності та об'єктивності наукових результатів і висновків дисертації забезпечується також використанням правильно підібраного сучасного математичного апарату теорії ймовірностей, математичної статистики, методів машинного навчання, векторного числення та основ квантової інформатики. Працездатність розроблених методів (зокрема, зворотно-зваженої інтерполяції IDW, алгоритмів кластеризації K-Means, автокореляційного аналізу та тестів Дікі-Фуллера) доведено на надзвичайно великих масивах реальних емпіричних даних (понад 1,5 мільйона записів з розподіленої мережі Eco-City та понад 500 тисяч комплексних записів зі станцій Vaisala AQT420). Висока збіжність результатів квантово-гібридного моделювання з реальними процесами накопичення забруднювачів, а також успішна дослідна експлуатація програмного комплексу (на базі Laravel, R Shiny, Python) безперечно підтверджують достовірність та відтворюваність наукових результатів дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження Вадуріна Кирила Олеговича полягає у синергетичному поєднанні методів геопросторового аналізу, квантово-інспірованих алгоритмів машинного навчання та когнітивних технологій штучного інтелекту для створення єдиного, адаптивного та ресурсоефективного конвеєра предикативної обробки екологічних даних на муніципальному рівні. Наведені в тексті дисертаційної роботи положення загалом сформульовані на належному науковому рівні, однак містять типові недоліки: частково змішуються науковий результат і практичний ефект, не завжди чітко виділено механізм досягнення результату («за рахунок чого»), а окремі відмінності від існуючих підходів потребують більш формалізованого акцентування. Нижче наведено рекомендовану редакцію:

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

2. **Набули подальшого розвитку** підходи до формалізованого опису геопросторових екологічних процесів за рахунок розроблення методу створення віртуальних прогнозних станцій на основі поєднання зворотно-зваженої інтерполяції та симуляції антропогенного навантаження, що, на відміну від існуючих підходів, забезпечує відтворення просторових характеристик забруднення в зонах відсутності фізичних сенсорів та дозволяє ідентифікувати потенційні приховані джерела забруднення.

3. **Удосконалено** метод прогнозування стану атмосферного повітря за рахунок побудови квантово-гібридної архітектури з інтеграцією варіаційних

квантових шарів у рекурентні структури моделі, що, на відміну від відомих методів прогнозування, забезпечує, в умовах обмежених вибірок даних, зниження середньоквадратичної помилки прогнозу в діапазоні 45...74 % та відносну точність прогнозування, яка розрахована на основі нормованої середньої абсолютної похибки, не менше ніж 97 %.

4. **Удосконалено** теоретико-прикладні засади підтримки управлінських рішень на базі обробки даних екологічного моніторингу за рахунок розроблення математичного апарату автономного когнітивного агента, який реалізує цикл «планування–виконання–синтез», що, на відміну від існуючих підходів до інтелектуальної підтримки прийняття рішень, поєднує автоматизоване оцінювання надійності прогнозів та інтерпретацію комплексних екологічних ризиків і забезпечує підвищення обґрунтованості результатів аналітичної підтримки.

Практична цінність одержаних результатів. Запропоновані Вадуріним К.О. моделі, алгоритми та архітектурні рішення забезпечують вагомий практичний вплив на процеси цифровізації екологічного управління, надаючи муніципалітетам потужний інструмент для реалізації концепції Smart City.

1. У сфері методичного забезпечення розроблено процедури автоматизованого аналізу параметрів часових рядів екологічних показників, що дозволяє динамічно обирати найкращу прогностичну стратегію (між ARIMA, BATS або квантовими моделями). Створено математичний апарат оцінки екологічних ризиків із використанням кластеризації K-Means для просторової стратифікації територій за рівнем небезпеки.

2. Програмно-апаратне забезпечення реалізовано у вигляді комплексного вебдодатку на базі стеку Laravel, MySQL та R Shiny, що забезпечує високошвидкісну обробку даних за принципом SPA. Створено модулі для периферійних шлюзів, які використовують алгоритми Isolation forest та Autoencoders для детектування мережевих аномалій у потоках LwM2M.

3. Впровадження технології забезпечило відчутний економічний та технічний ефект. Реалізація модуля автоматизованого формування регламентної звітності за Постановою № 827 КМУ скоротила час підготовки документації з 4 годин до 30 хвилин. Перехід від пропріетарних хмарних рішень (типу Vaisala) до власної інфраструктури на базі відкритих технологій та віртуальних прогнозних станцій гарантує економію понад 90% муніципальних бюджетних коштів на розгортання та утримання системи моніторингу (з прямим економічним ефектом понад 29 тис. грн лише за період апробації).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена за такою структурою: вступ, чотири розділи, висновки, список джерел посилання (134 найменування) та 3 додатки (з переліком публікацій, актами впровадження та фрагментами розробленого програмного коду). Загальний обсяг становить 215 сторінок, з яких основний текст викладено на 137 сторінках, включаючи 20 рисунків та 22 таблиці. Список джерел посилання складає 19 сторінок та 3 додатки викладено на 35 сторінках. Структура та обсяг цієї дисертації відповідають чинним вимогам та нормам.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях. За темою дисертації опубліковано 21 наукова праця, із яких: 2 статті у періодичних наукових виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus (квартиль Q1), 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 конференції, які включено до міжнародної наукометричної бази Scopus та 10 тез доповідей у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференцій (Київ, Харків, Дніпро, Кременчук).

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. Практичне впровадження результатів декларується автором через високий ступінь готовності розробленої технології до практичного використання, що підтверджено актами впровадження у діяльність профільних підприємств та закладів вищої освіти:

1. Комунальне підприємство «Науковий центр еколого-соціальних досліджень» (м. Кременчук) впровадило у виробничу діяльність розроблені програмно-апаратні рішення для об'єднання різнорідних даних з метеостанцій Lufft WS600 та станцій якості повітря AQT420, алгоритми візуалізації для газоаналізаторів ПМЕЛ, а також модуль автоматизованого формування нормативної звітності (постанова КМУ №827).

2. Товариство з обмеженою відповідальністю «ЛЕМПДЕВ» (м. Кременчук) застосувало методологію проєктування на основі моделі DPPDMext, алгоритми доступу ABAC та адаптований стек LwM2M при розробці та розгортанні спеціалізованих систем екологічного моніторингу для муніципальних замовників, що дозволило знизити накладні витрати мережі.

3. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського впровадив теоретичні положення моделі DPPDMext, архітектуру когнітивних агентів та методику квантово-гібридного прогнозування у навчальний процес при підготовці бакалаврів та магістрів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» (у межах дисциплін «Проектування систем моніторингу», «Технології Інтернету речей», «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 Кирила Олеговича є результатом самостійних і оригінальних досліджень. Дисертація спирається на 134 літературні джерела, значна частка яких представляє сучасні англomовні статті (2020-2025 років) з провідних світових баз даних. Коректність цитування витримана на всьому масиві тексту: автор сумлінно вказує посилання на результати інших дослідників. Робота не містить жодних 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 з широким використанням сучасної технічної термінології. Дисертація написана за об'єктивно побудованим планом та характеризується чіткою структурою. Стиль викладення матеріалу є чітким, логічним і лаконічним. Синтаксичні конструкції побудовані грамотно, стилістичних чи граматичних хиб, які б знижували рівень сприйняття наукового матеріалу, під час аналізу тексту не виявлено. Анотації українською та англійською мовами адекватно відображають зміст роботи.

Аналіз змістовного наповнення дисертації. У вступі лаконічно, але вичерпно розкрито актуальність теми у світлі глобальної цифровізації та директив ЄС, сформульовано мету та задачі дослідження, обґрунтовано наукову новизну та практичну цінність, наведено дані щодо особистого внеску здобувача та апробації результатів.

Перший розділ є системним аналізом проблемної області. Автор детально розглядає розвиток методів екологічного моніторингу, від ГІС-систем до складних гідродинамічних та статистичних моделей. Доведено, що більшість існуючих систем фокусуються лише на реєстрації даних, не забезпечуючи замкненого циклу аналітики. Виявлено критичні обмеження щодо використання важких веб-протоколів у ресурс-обмежених IoT-мережах та проблеми перенавчання класичних нейромереж на малих вибірках, що формує ідеальну базу для постановки задач дисертації.

У другому розділі закладено основний теоретико-математичний фундамент досліджуваної технології. Здобувач формалізує концептуальну модель DPPDMext як кортеж множин. Детально описується математичний апарат зворотно-зваженої інтерполяції для створення віртуальних станцій, що дозволяє закривати «сліпі плями» в мережі моніторингу. Розроблено архітектуру корпоративної IoT-мережі, обґрунтовано вибір протоколу LwM2M та формалізовано задачу цілочисельного лінійного програмування для мінімізації витрат на розміщення сенсорів із забезпеченням моделі управління доступом АВАС.

Третій розділ становить інтелектуальне ядро роботи. Автор формалізує п'ятикрокову процедуру автоматичного аналізу часових рядів (від дескриптивних статистик до спектрального аналізу FFT). Найвагомим результатом розділу є розробка квантово-гібридних прогностичних моделей, де класичні дані кодуються у квантові стани через варіаційні схеми, що розв'язує проблему «прокляття розмірності» на коротких часових інтервалах. Розділ

завершується розробкою алгоритму для когнітивного LLM-агента, який на основі генерації з доповненим пошуком та обчислення індексів ERI/CRI формує зрозумілі експертні висновки.

Четвертий розділ присвячений архітектурній реалізації та глибокій експериментальній апробації системи. Описано стек технологій (Laravel, Vue.js, R Shiny). Валідація на реальних даних (понад 1,5 млн записів з м. Кременчук) довела беззаперечну перевагу квантово-гібридних алгоритмів (зниження MSE) для нестационарних рядів забруднювачів. Показовим є практичний кейс виявлення прихованого джерела викидів формальдегіду на Крюківському мосту за допомогою віртуальної станції. Належним чином проведено оцінку економічної та операційної ефективності впровадження.

Загальні висновки повністю узгоджуються з поставленими завданнями, підтверджуючи досягнення поставленої мети в дисертації, а додатки надають необхідний фактологічний та програмний контекст (від актів впровадження до лістингів Python-коду).

Отже, можна зазначити, що дисертація Вадуріна К.О. є чітко структурованим і змістовним дослідженням, що дозволило здобувачеві в повному обсязі розкрити тему дослідження.

Зауваження, коментарі та дискусійні положення щодо змісту дисертації. Під час детального ознайомлення з матеріалами дисертації Вадуріна К.О., відзначаючи її високий науковий рівень та практичну значущість, було визначено наступні зауваження, коментарі та дискусійні положення:

1. У третьому розділі, при розробці механізму адаптивного вибору моделі прогнозування (Блок Q), автор використовує класичні метрики якості, такі як середньоквадратична похибка та інформаційний критерій Акаїке. Однак екологічні часові ряди характеризуються високою асиметрією наслідків: недооцінка пікового (аварійного) викиду токсичного газу є значно критичнішою, ніж його переоцінка. Доцільним було б обґрунтувати можливість використання кастомних асиметричних функцій втрат під час навчання та вибору оптимальної моделі.

2. Розробляючи математичне забезпечення геопросторового моделювання віртуальних станцій (Блок M, другий та четвертий розділи) на базі методу зворотно-зважених відстаней, автор наводить узагальнену формулу (2.5). Проте у тексті бракує глибокого аналізу процедури динамічного підбору вагового параметра згладжування. Відомо, що розсіювання важких часток (наприклад, пилу PM10) і легких газів суттєво відрізняється під впливом вітру, отже, параметр p мав би адаптуватися залежно від фізико-хімічних властивостей конкретного маркера (наприклад, для важкого пилу PM10 він має суттєво відрізнятися від легких газів CO).

3. Упроваджуючи інноваційний підхід із застосуванням автономного LLM-агента для експертної оцінки та генерації управлінських рішень (Блоки E та F), автор використовує технологію RAG. Водночас, враховуючи відому проблему схильності великих мовних моделей до «математичних галюцинацій» при роботі з числовими екстраполяціями, в роботі не наведено окремої кількісної метрики

(наприклад, hallucination rate) для оцінки коректності виключно числової аргументації, яку агент додає у свої текстові висновки.

4. Описуючи периферійний рівень системи та адаптацію протоколу LwM2M з DTLS-шифруванням для мікроконтролерів ESP32, здобувач наводить дані щодо використання оперативної пам'яті (6–9%). Проте для комплексного підтвердження робастності IoT-мережі було б корисно навести результати стрес-тестування Bootstrap-сервера в умовах масового одночасного перепідключення сотень сенсорів (наприклад, після масштабного знеструмлення міста), що є типовим сценарієм в поточних реаліях експлуатації інфраструктури в Україні.

5. При застосуванні відстані Махаланобіса D_M (стор. 90) для виявлення багатовимірних аномалій, математичний опис не деталізує методи регуляризації матриці коваріацій Σ^{-1} в умовах високої мультиколінеарності ознак (наприклад, сильної кореляції між фракціями пилу PM2.5 та PM10).

6. Імітаційна модель генерації трафіку для «віртуальної станції» (Крюківський міст) заснована на евристичних алгоритмах A^* та Гауссівського фільтра розсіювання, проте статистичне доведення адекватності цієї імітації (ground truth verification) є обмеженим через об'єктивну відсутність фізичних сенсорів на самому мосту.

7. Описуючи квантово-гібридну модель (підрозділ 3.2, сторінки 86 та 87), автор згадує, що використання від 2 до 6 кубітів діє як неявна регуляризація, що запобігає виникненню відомої у квантовому навчанні проблеми «Плато Барна» (Barren Plateaus). Проте, строгого математичного доведення або емпіричного графіка згасання градієнтів саме для цієї архітектури в тексті не наведено.

8. У підрозділі 1.3.1 слушно зазначається проблема дефіциту оперативної пам'яті (10 – 50 Кб) для кінцевих IoT-вузлів. Проте в тексті роботи, при обґрунтуванні вибору протоколу комунікації, не наведено кількісної порівняльної оцінки енергоспоживання (автономності роботи від батареї) мікроконтролерів під час використання протоколу LwM2M порівняно зі, наприклад, стандартним MQTT. Дається порівняльна характеристика лише за такими параметрами як витрати пам'яті та рівень захисту.

Слід зазначити, що наведені вище 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 ступеня доктора філософії ВАДУРИНА Кирила Олеговича на тему «Інформаційна технологія підготовки та обробки даних екологічного моніторингу на муніципальному рівні» є оригінальним, самостійним та повністю завершеним науковим дослідженням. У роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу створення цілісної високоефективної 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. Робота виконана на високому науковому рівні та не порушує принципів академічної доброчесності.

За актуальністю теми, обсягом і рівнем виконаних досліджень, науковою новизною та практичною цінністю одержаних результатів ця дисертаційна робота відповідає вимогам чинного законодавства України, 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

доцент кафедри електропривода
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
кандидат технічних наук, доцент

Григорій ДЯЧЕНКО