

Голові разової СВП із захисту  
дисертації Вадуріна К.О.  
д. т. н., проф. Лактіонову І.С.  
опонента  
д. т. н., проф., Шекети В. І.

### **ВІДГУК**

доктора технічних наук, професора, професора кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу **Шекети Василя Івановича** 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 Європейського Союзу 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 рішення в галузі інформаційних технологій 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 вузлів Інтернету речей, 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 протоколи Інтернету речей, алгоритми просторової інтерполяції, квантово-гібридні нейромережі та мультимодальні когнітивні агенти, 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 Кабінету Міністрів України № 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» (місто 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: «Програмно-апаратне рішення інформаційної системи екологічного моніторингу для забруднення-орієнтованого керування» (номер державної реєстрації 0124U004830), «Інформаційна модель системи керування кластером забруднення-орієнтованих пристроїв» (номер державної реєстрації 0124U004831), а також госпдоговірних тем № 0123U105056, № 0123U105054 та № 0123U105055.

*Особистий внесок здобувача у виконання зазначених науково-дослідних робіт* полягає у самостійному розробленні концептуальної архітектури та функціоналу прогнозувальної 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 великих мовних моделей для автоматизації аналізу якості прогнозів і формування управлінських рішень.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових результатів і висновків.** 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 спеціалізованої 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. *Набули подальшого розвитку* підходи до формалізованого опису геопросторових екологічних процесів шляхом розроблення методу створення віртуальних прогнозних станцій на основі поєднання зворотно-зваженої інтерполяції та симуляції 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 стану атмосферного повітря за рахунок побудови квантово-гібридної архітектури з інтеграцією варіаційних квантових шарів у рекурентні структури моделі. На відміну від базових рекурентних нейронних мереж та класичних 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 підтримки управлінських рішень на базі обробки даних екологічного моніторингу за рахунок розроблення математичного апарату 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 пошуково-доповненої генерації, що поєднує автоматизоване оцінювання надійності прогнозів, інтерпретацію комплексних екологічних ризиків і генерування структурованих вербальних планів реагування для муніципальних служб.

**Практична цінність 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 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.

Практична цінність також полягає у створенні надійної програмної інфраструктури, яка інтегрує легковагові комунікаційні протоколи та моделі безпеки на рівні периферійних обчислень, що є надзвичайно важливим для розгортання масштабованих та ресурсоефективних систем муніципального моніторингу.

**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 Міністерства освіти і науки України.

**Упровадження та використання результатів дисертаційного дослідження.** Практичне впровадження результатів дисертаційного дослідження 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» (місто 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 відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №827. Це дозволило скоротити час підготовки регламентних документів з 4 годин до 30 хвилин.

2. Товариство з обмеженою відповідальністю «ЛЕМПДЕВ» (місто Кременчук) застосувало методологію проєктування на основі моделі DPPDMext, алгоритми динамічного контролю доступу АВАС та адаптований стек LwM2M при розробці спеціалізованих систем екологічного моніторингу для муніципальних замовників. Децентралізована архітектура збору даних забезпечила пряму економію понад 90% муніципальних бюджетних коштів на розгортання порівняно з пропрієтарними хмарними рішеннями (економічний ефект склав понад 29 тисяч гривень лише за період апробації).

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 «Проєктування систем моніторингу», «Технології Інтернету речей», «Кіберфізичні системи».

**Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях.** За темою дисертаційного дослідження здобувачем Вадуріним К.О. опубліковано 21 наукову працю. Серед них: 2 статті у провідних закордонних періодичних виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus (журнали квантилів 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 Порядку присудження ступеня доктора філософії, що дозволяє стверджувати про повне і вичерпне висвітлення наукових результатів дисертації у відкритому доступі.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеності, відповідності встановленим вимогам та дотримання принципів академічної доброчесності.** За своїм змістовним наповненням дисертаційне дослідження здобувача повністю відповідає Освітньо-науковій програмі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» та стандарту вищої освіти для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

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 є актуальними англійськими статтями за 2020-2025 роки з провідних світових баз даних.

**Мова та стиль викладання результатів.** 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. Анотації українською та англійською мовами адекватно відображають зміст роботи.

**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 мережах Інтернету речей та проблеми перенавчання класичних глибоких нейромереж на «малих вибірках», що формує ідеальну доказову базу для постановки задач 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 мережі Інтернету речей, обґрунтовує вибір протоколу LwM2M та формалізує задачу цілочисельного лінійного програмування для мінімізації витрат на розміщення сенсорів із забезпеченням суворої моделі динамічного управління доступом на основі атрибутів 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 кодується у квантові стани через варіаційні схеми, що елегантно розв'язує проблему «прокляття розмірності» на коротких часових інтервалах. Розділ завершується розробкою алгоритму для автономного когнітивного великого мовного 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.

Висновки дисертації автором виписані чітко та розкривають поставлені у вступі завдання. Додатки до дисертації містять довідковий матеріал, що органічно доповнює основний зміст роботи, включаючи: перелік публікацій, копії актів впровадження та лістинги блоків розробленого програмного коду.

**Зауваження, коментарі та дискусійні положення щодо змісту дисертації.** Проведений аналіз дисертаційної роботи Вадуріна К.О. дає підстави для її високої загальної оцінки як з боку наукової новизни, так і з боку програмної реалізації та інженерної зрілості запропонованих рішень. Водночас, як офіційний опонент, вважаю за необхідне висловити низку зауважень та дискусійних положень щодо змісту роботи:

1. У четвертому розділі описано реалізацію системи на базі фреймворків Laravel, Vue.js та R Shiny. Проте в тексті недостатньо розкрито питання програмної архітектури розгортання. Використання мікросервісної архітектури з контейнеризацією, наприклад, Docker/Kubernetes, замість монолітного підходу дозволило б значно підвищити надійність та масштабованість муніципальної системи при збільшенні навантаження.

2. Програмний комплекс успішно інтегрує дані зі станцій Vaisala та Eco-City. Однак у дисертації бракує опису універсального патерну, або Middleware-прошарку, для розширення системи. Залишається незрозумілим, наскільки ресурсомістким з точки зору рефакторингу коду буде підключення датчиків від нових виробників зі специфічними API-форматами.

3. Описуючи блок генерації управлінських рішень за допомогою когнітивного агента, автор зосереджується на якості та точності текстових висновків. Водночас, з погляду програмної інженерії, доцільно було б навести результати оцінки юзабіліті, наприклад, за метрикою SUS – System Usability Scale, розробленого людино-машинного інтерфейсу кінцевими користувачами – нетехнічними працівниками муніципалітетів.

4. У роботі наведено результати перевірки точності предикативних моделей MSE, MAE. Проте, враховуючи складність розробленої інформаційної технології, у дисертації не приділено уваги методам автоматизованого тестування самого програмного коду, Unit-тести, Integration-тести, та покриттю коду тестами в межах пайплайну CI/CD, що є стандартом для сучасних IT-проектів.

Зазначені зауваження вказують на напрями подальшого розвитку дослідження, мають дискусійний характер і не ставлять під сумнів наукову новизну та практичну цінність дисертації. Робота виконана на належному науковому рівні.

**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 високоефективної інформаційної

технології, здатної на базі гібридних алгоритмів штучного інтелекту, квантових обчислень та легковагових протоколів Інтернету речей автоматизувати весь цикл екологічної аналітики муніципалітетів від захищеного збору даних до синтезу управлінських рішень.

За актуальністю теми, рівнем наукової новизни, обсягом проведених досліджень, практичною цінністю одержаних 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, та вимогам 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,**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри інженерії  
програмного забезпечення  
Івано-Франківського  
національного технічного  
університету нафти і газу

Василь ШЕКЕТА