

Рішення разової спеціалізованої вченої ради про присудження ступеня доктора філософії

Здобувач ступеня доктора філософії **Вадурін Кирило Олегович**, 1998 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчив у 2021 році Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка», освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка». Із 2022 року аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, із 2025 року – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро. Виконав акредитовану освітньо-наукову програму «Комп'ютерні науки». Дисертацію виконано на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, та кафедрі комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, м. Кременчук.

Наукові керівники: кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Удовик Ірина Михайлівна; доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Перекрест Андрій Леонідович.

Разова спеціалізована вчена рада, утворена рішенням Вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» МОН України, м. Дніпро від «12» червня 2026 року Протокол № 17, Наказ від «12» червня 2026 року № 17 у складі:

Голова разової спеціалізованої вченої ради – **Лактіонов Іван Сергійович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро.

Рецензенти:

Швачич Геннадій Григорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро.

Дяченко Григорій Григорійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро.

Офіційні опоненти:

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

Шекета Василь Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ.

На засіданні «21» липня 2026 року прийняла рішення про присудження

ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» Вадуріну Кирилу Олеговичу на підставі публічного захисту дисертації «Інформаційна технологія підготовки та обробки даних екологічного моніторингу на муніципальному рівні» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису, українською мовою.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. 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.

2. Удосконалено метод просторового аналізу та моделювання полів екологічного забруднення шляхом алгоритмічного синтезу паралельних часових рядів цільової та динамічної фонові точок спостереження на основі часовоітеративної 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.

3. 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.

4. 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.

Здобувачем **Вадуріним К.О.** за темою дисертації опубліковано 21 наукову працю, із яких: 2 статті у періодичних закордонних виданнях, що проіндексовані у базі даних Scopus; 6 статей у наукових фахових періодичних виданнях України (категорії «Б»); 2 статті у матеріалах міжнародних конференцій, що також індексуються наукометричною базою Scopus; 11 публікацій апробаційного

характеру у збірниках тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. Зокрема:

1. Vadurin K., Perekrest A., Bakharev V., Shendryk V., Parfenenko Y., Shendryk S. Towards Digitalization for Air Pollution Detection: Forecasting Information System of the Environmental Monitoring. *Sustainability* 2025, 17, 3760. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17093760>

2. Peksa J., Perekrest A., Vadurin K., Mamchur D. A Quantum-Hybrid Framework for Urban Environmental Forecasting Integrating Advanced AI and Geospatial Simulation. *Sensors* 2025, 25, 7422. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25247422>

3. Vadurin K., Kramek A., Perekrest A. Conceptual Models of Data Collection, Forecasting and Preparation Processes for Professional Analysis in Environmental Monitoring Information Systems. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2026, pp. 75–87. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-09806-1_7

4. Перекрест А. Л., Бахарев В. С., Вадурін К. О., Дерієнко А. І., Іващенко А. В., Шкарупа С. А. Розробка бази даних для зберігання показників стану атмосферного повітря з дослідних станцій комунального підприємства. *Проблеми інформатизації та управління*. 2023. Вип. 3(75). С. 68–86. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.75.18018>

5. Zavaliev A., Vadurin K., Perekrest A., Bakharev V. Information and analytical system for collecting, processing and analyzing data on air pollution. *Automation of Technological and Business Processes*. 2024. 16(1). С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i1.2774>

6. Вадурін К. О., Перекрест А. Л., Бахарев В. С., Дерієнко А. І., Іващенко А. В., Шкарупа С. А. Інформаційна система збору та накопичення даних про якість атмосферного повітря зі станцій Vaisala муніципального рівня. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2023. № 2(06). С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2023-02-06-04>

7. Удовик І. М., Вадурін К. О. Дослідження стану предметної області інтелектуального аналізу часових рядів та геопросторового моделювання в муніципальних системах екологічного моніторингу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2026. № 2. С. 158–171. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2026.2.16>

8. Vadurin K., Perekrest A., Mamchur, D., Vladov, S. Components of ensuring secure infrastructure for environmental monitoring systems using the LwM2M protocol. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4024. P. 287–306. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4024/paper19.pdf>

9. Коростельов А. С., Гученко М. І., Перекрест А. Л., Нікітіна А. В., Вадурін К. О. Модель корпоративної мережі базованої на технологіях інтернету речей підприємства з екологічних досліджень. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Вип. 3(73). С. 111–114. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.111>

10. Коростельов А. С., Гученко М. І., Перекрест А. Л., Самойлов А. М., Вадурін К. О. Аналітичні розрахунки корпоративної мережі базованої на технологіях Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73), № 5. С. 140–147. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/23>

11. Perekrest A., Mamchur D., Zavaleev A., Vadurin K., Malolitko V., Bakharev V. Web-Based Technology of Intellectual Analysis of Environmental Data of an Industrial Enterprise. In *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402523>

У дискусії взяли участь усі члени разової спеціалізованої вченої ради.

Голова ради д.т.н., проф. **Лактіонов І.С.:**

Запитання № 1: У вашій роботі значна роль відведена когнітивному агенту на базі великих мовних моделей, який генерує готові звіти. Чи означає це, що ваша система здатна повністю замінити еколога-аналітика у процесі прийняття рішень?

Запитання № 2: Під час збору екологічних даних із недорогих муніципальних сенсорів ми часто стикаємося з відверто хибними показами через погодні умови чи збої живлення. Як ваша технологія гарантує, що недостовірні дані не потраплять до математичних моделей і не зіпсують прогноз?

Здобувач **Вадурін К.О.** відповіді на запитання:

Відповідь на запитання № 1: Ні, система створена не як заміник, а як розумний помічник для фахівця. Когнітивний агент бере на себе всю рутину: він розраховує статистику, виявляє аномалії, рахує індекси ризику та готує «чорновик» звіту з поясненнями. Проте фінальне рішення – наприклад, перекрити рух транспорту на мосту чи відправити інспекцію на завод – завжди приймає і затверджує виключно людина-фахівець у відповідній галузі, яка перед роботою з системою надає агенту усю доступну інформацію про досліджувану ділянку, події та можливі впливи у текстовому та графічному форматі. Це класична система підтримки прийняття рішень.

Відповідь на запитання № 2: Для цього передбачено етап автоматичного препроцесингу показаний у Блоці А. Щойно дані надходять до бази, вони проходять через статистичний фільтр та алгоритм пошуку аномалій. Якщо показник неприродно різко «вистрибує» і не підтверджується сусідніми датчиками, система автоматично маркує його як апаратний збій і замінює медіанним значенням. У результаті моделі прогнозування навчаються лише на чистих та достовірних даних.

Рецензент д.т.н., проф. **Швачич Г.Г.** Рецензія є позитивною. Зауваження та дискусійні положення:

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 посилює 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.

Зазначені зауваження та коментарі мають переважно дискусійний та рекомендаційний характер, спрямовані на окреслення перспектив подальшого розвитку дослідження, і жодним чином не знижують загальної високої наукової та практичної цінності дисертаційної роботи **Вадуріна К.О.**, а лише можуть слугувати предметом плідної наукової дискусії під час захисту.

Запитання № 1: У своєму відгуку я звертав увагу на проблему «квантового шуму» та декогеренції. Як саме ваша система здатна впоратися з цим шумом, якщо її перенести з ідеального симулятора на реальний фізичний квантовий процесор?

Запитання № 2: Ви використовуєте 10-відсотковий поріг просторової фільтрації для визначення безпечних «фонових» зон. Чому саме 10%, а не, скажімо, 5% чи 20%?

Здобувач **Вадурін К.О.** із зауваженнями рецензента погоджується та дає такі відповіді на запитання:

Відповідь на запитання № 1: У технології використовуємо гібридний підхід. Квантовий шар у нашій мережі є дуже коротким, лише від 2 до 5 кубітів у різних конфігураціях моделей, він виконує роль вилучення складних ознак, а класична частина нейромережі потім «згладжує» результат. Більше того, ця обмежена кількість кубітів природним чином діє як фільтр, або регуляризатор, відсікаючи зайвий шум, що робить модель стійкою навіть на реальному обладнанні.

Відповідь на запитання № 2: Це значення підібрано експериментально. Якщо взяти 5%, ми отримаємо занадто мало точок на карті, і розрахунок фону буде неточним. Якщо взяти 20%, то в «чисту» фонову зону почнуть потрапляти велика кількість локації з окремими локальними забрудненнями. 10% виявилось оптимальним значенням для покриття відфільтрованими точками досліджуваної частини Кременчуцької агломерації в рамках дослідження поширення забруднень дорогами Полтавщини.

Рецензент к.т.н., доц. **Дяченко Г.Г.** Рецензія є позитивною. Зауваження 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.

Запитання № 1: У роботі Ви зазначали, що пропустити пік викиду небезпечного газу набагато небезпечніше, ніж дати хибну тривогу. Як саме ця логіка врахована у ваших алгоритмах вибору моделі прогнозування?

Запитання № 2: Ви обрали протокол LwM2M для економії ресурсів. На скільки реально вистачить автономного живлення такого датчика на базі ESP32 у міських умовах?

Здобувач **Вадурін К.О.** із зауваженнями рецензента погоджується та дає такі відповіді на запитання:

Відповідь на запитання № 1: Саме з цієї причини головним критерієм вибору найкращої моделі обрано середньоквадратичну помилку. Математично ця метрика набагато сильніше штрафує алгоритм за великі відхилення. Тобто система автоматично віддає перевагу тій моделі, яка краще і точніше ловить різкі піки, а не тій, що просто добре описує стабільний фон.

Відповідь на запитання № 2: Завдяки LwM2M ми передаємо дані у легкому бінарному форматі. Радіомодуль 4G вмикається на лічені секунди, а решту часу хаб перебуває у стані глибокого сну. Тому на стандартному LiFePO4 на 9 А·год, така станція здатна працювати до 8 годин без зовнішнього живлення.

Офіційний опонент д.т.н., проф. **Мірошник М.А.** Відгук є позитивним. Зауваження та дискусійні положення:

1. У другому розділі під час проєктування 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.

Запитання № 1: Ви пропонуєте збирати всі дані на центральний сервер. Чи не логічніше було б змусити самі шлюзи або датчики фільтрувати аномалії на місці, щоб не перевантажувати мережу?

Запитання № 2: Хімічні датчики якості повітря з часом деградують і починають показувати завищені або занижені дані. Як ваші алгоритми розуміють, що це зламався датчик, а не відбулося реальне забруднення?

Запитання № 3: Як вашу систему можна інтегрувати з мобільними екологічними дронами, які зараз активно тестуються у світі?

Здобувач **Вадурін К.О.** із зауваженнями опонента погоджується та дає такі відповіді на запитання:

Відповідь на запитання № 1: Так, це дуже правильний підхід. У поточній архітектурі частково реалізовано концепцію граничних обрахунків: легкі алгоритми виявлення мережових аномалій, такі як Isolation Forest, розгорнуто прямо на проміжних шлюзах. Вони відсікають апаратні збої на місці, а на сервер надсилаються лише оброблені та верифіковані дані від сенсорів дані.

Відповідь на запитання № 2: Для цього в блоці А аналізу використовується тест Дікі-Фуллера та розкладання ряду на складові: тренд і сезонність. Якщо система бачить повільне, монотонне і неприродне зростання показника без характерних добових коливань, когнітивний агент розуміє, що це не викид заводу, а деградація датчика, і видає рекомендацію на його калібрування.

Відповідь на запитання № 3: Наша архітектура на базі протоколу LwM2M легко підтримує мобільні об'єкти. Дрону достатньо разом із показниками газу передавати свої поточні GPS-координати. Потрапляючи на сервер, ці динамічні координати одразу підхоплюються блоком просторової інтерполяції, і наша теплова карта забруднення буде оновлюватися слідом за рухом дрона в режимі реального часу.

Офіційний опонент д.т.н., проф. **Шекета В.І.** Відгук є позитивним. Зауваження та дискусійні положення:

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.

Запитання № 1: Ваша система генерує текстові управлінські рішення за допомогою штучного інтелекту. Чи оцінювали ви, наскільки ці тексти реально зрозумілі звичайним працівникам міської адміністрації та працівникам екологічного підприємства, які не є IT-спеціалістами?

Запитання № 2: Муніципальні інформаційні системи вимагають високої надійності роботи програмного забезпечення. Як ви тестуєте свій код перед тим, як впровадити оновлення на головний сервер міста?

Запитання № 3: Ви зберігаєте високочастотні дані з датчиків у звичайній реляційній базі MySQL. Чому не обрали спеціалізовані бази для часових рядів, наприклад, InfluxDB, які створені саме для цього?

Здобувач **Вадурін К.О.** із зауваженнями опонента погоджується та дає такі відповіді на запитання:

Відповідь на запитання № 1: Так. Когнітивний LLM-агент спеціально налаштований, через системний промпт, уникати складних математичних термінів. Замість того, щоб писати «дисперсія ряду вийшла за межі», агент пише «зафіксовано нестабільний рівень пилу, рекомендуємо направити мобільну лабораторію». На практиці екологи КП НДЦ Кременчука оцінили понад 75% таких звітів як зрозумілі для формування подальших гіпотез з встановлення джерел забруднення.

Відповідь на запитання № 2: Використовуємо підходи автоматизованого тестування. Коли в систему додається, наприклад, новий метод прогнозування,

скрипт автоматично проганяє Unit-тести на історичних вибірках даних. Тільки якщо точність не впала і код відпрацював без помилок на локально розгорнутій тестовій системі, оновлення допускається до роботи та встановлюється на віртуальній сервер.

Відповідь на запитання № 3: На даному етапі MySQL була обрана для повної сумісності з нашим бекенд-фреймворком Laravel та простоти адміністрування комунальним підприємством. Щоб система керування базою даних не мала великих затримок при обробці даних, структурно розділено дані: покази що надходять ід шлюзів зберігаються в одних, початкових, таблицях, а вже усереднені дані для графіків та аналітики – в інших. Хоча я погоджуюсь з Вами: при масштабуванні системи на рівень області чи всієї країни перехід на InfluxDB буде одним з першочергових завдань.

Результати відкритого голосування:

«За»	<u>5</u>	членів ради,
«Проти»	<u>0</u>	членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада присуджує **Вадуріну Кирилу Олеговичу** ступінь доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Голова разової спеціалізованої
вченої ради



 Іван ЛАКТИОНОВ