



DOI 10.28925/2663-4023.2025.30.955

УДК 504.05:528.8:004.9:656.7

Тетяна Іванівна Носенко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-7597-9861
t.nosenko@kubg.edu.ua

Ірина Вікторівна Машкіна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID: 0000-0003-0667-5749
i.mashkina@kubg.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ЕКОЛОГІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ БПЛА ТА МЕТОДУ IDW

Анотація. У статті розглянуто проблему оперативного екологічного моніторингу радіаційного забруднення в умовах зростання техногенних ризиків. Обґрунтовано доцільність використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених IoT-сенсорами, як мобільної платформи для збору даних. Запропоновано трирівневу архітектуру системи мобільного моніторингу, що включає модулі збору, обробки та візуалізації даних. Основну увагу приділено розробці алгоритму обробки просторово-розподілених даних, який включає фільтрацію шумів, агрегацію та просторову інтерполяцію методом зважених обернених відстаней (IDW). Проведено моделювання алгоритму на реальних даних, отриманих з БПЛА, та продемонстровано здатність системи генерувати інтерактивні карти забруднення. Робота спрямована на подолання обмежень традиційних підходів і створення науково-методичного апарату для мобільного радіаційного моніторингу.

Ключові слова: БПЛА; IoT-датчики; метод зважених обернених відстаней; інтерполяція; теплокарта; клієнт-серверна архітектура

ВСТУП

В умовах зростання техногенних загроз та підвищення ризиків виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із радіаційним забрудненням, завдання оперативного та точного екологічного моніторингу набуває виняткової важливості. Надійний контроль за радіаційною обстановкою є критичним елементом національної безпеки, захисту здоров'я населення та збереження навколишнього середовища.

Постановка проблеми. Існуючий ландшафт рішень для такого моніторингу демонструє чіткий технологічний розрив. З одного боку, існують глобальні системи на основі мереж стаціонарних наземних станцій (наприклад, європейська система EURDEP). Вони забезпечують моніторинг загального фону, але мають низьку просторову роздільну здатність і не здатні до оперативного реагування на локальні інциденти. З іншого боку, існують високоспеціалізовані локальні системи, такі як японські наземні роботи COMRIS та iRIS. Вони надзвичайно точні для завдань деактивації об'єктів чи пошуку джерел, але є повільними, мають обмежений радіус дії і не призначені для широкомасштабного моніторингу територій. [1]



Спроби заповнити цю прогалину за допомогою традиційних авіаційних платформ також мають суттєві обмеження. Моніторинг за допомогою супутникових даних є корисним для оцінки наслідків інциденту (межі зони, метеоумови, стан рослинності), проте супутники не можуть безпосередньо детектувати іонізуюче випромінювання. Моніторинг за допомогою пілотованих літальних апаратів дозволяє обстежувати значні площі з більшою деталізацією, але характеризується високою вартістю, складністю організації польотів та неможливістю роботи на критично важливих низьких висотах.

Технологічний прорив у сфері безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові горизонти для вирішення цієї проблеми. Інтеграція високочутливих IoT-датчиків на мобільні платформи БПЛА дозволяє поєднати переваги обох підходів: швидкість та широке охоплення авіаційних платформ з високою деталізацією та гнучкістю наземних систем. Такий підхід забезпечує оперативне обстеження великих площ, сканування об'єктів з безпечної відстані та отримання даних із раніше недоступних локацій при відносно низькій вартості.

Однак, отримання "сирих" даних з масиву дискретних точок, зібраних під час польоту БПЛА, є лише першим кроком. Ключовою науково-технічною задачею, що визначає ефективність усієї системи, є перетворення цього набору вимірювань на цілісну та інформативну модель просторового розподілу забруднення. Без розробки та моделювання ефективних алгоритмів обробки даних — що включають фільтрацію шумів, агрегацію та просторову інтерполяцію для побудови суцільних карт (heatmaps) — зібрана інформація залишається фрагментарною та малопридатною для прийняття рішень.

Таким чином, актуальність даного дослідження полягає в нагальній потребі розробки та моделювання саме таких алгоритмів обробки даних для нового покоління систем мобільного моніторингу. Робота спрямована на подолання обмежень традиційних підходів шляхом створення науково-методичного апарату для обробки динамічно зібраних даних та їх візуалізації у вигляді інтерактивних карт забруднення, що є необхідною ланкою між збором даних та їх аналітичною інтерпретацією [2-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових праць у сфері екологічного моніторингу свідчить про стійкий консенсус щодо необхідності фундаментальної модернізації існуючих систем спостереження. Дослідження розвиваються за кількома ключовими напрямками.

Розробка мобільних платформ збору даних. Сучасні українські дослідження активно зосереджені на створенні комплексних систем мобільного моніторингу. Роботи В. М. Триснюка, Т. В. Волинця [7] та їх співавторів присвячені інтеграції космічних, повітряних (зокрема, БПЛА) та наземних платформ для підвищення достовірності та інформативності моніторингу. Зокрема, Т. В. Волинець [8] пропонує науково-методичні підходи до оптимізації польоту БПЛА для оперативного виявлення забруднювачів. Окремий напрям присвячений інтерпретації зібраних даних: у роботі [9] запропоновано методику визначення зон екологічного ризику на основі даних ГІС та космічних знімків, що дозволяє створювати деталізовані екологічні карти.

Таким чином, вітчизняна наукова школа активно вирішує завдання розробки та оптимізації мобільних платформ для збору даних. Однак, це створює наступний виклик — необхідність ефективної обробки отриманих динамічних масивів інформації.

Технологічне переоснащення та інтелектуальний аналіз. Ключовою передумовою для вдосконалення є технічне переоснащення, як доводять В. С. Бахарев та А. В. Маренич [6]. Автори наголошують на важливості переходу до цифрових аналітичних датчиків з автоматизованою передачею даних у реальному часі. Ця ідея



отримує розвиток у працях, що інтегрують методи машинного навчання (МН) та Інтернету речей (IoT). П. Богайчук, М. Д. Рудніченко та Т. В. Отрадська [10] демонструють ефективність застосування алгоритмів МН для опрацювання великих датасетів про забруднення повітря. На світовому рівні робота Y. Y. F. Panduman та ін. [11] представляє архітектуру універсальної IoT-платформи SEMAR, що інтегрує методи штучного інтелекту (ШІ) для розширеного аналізу даних. Водночас праця P. Veda та ін. [12] демонструє практичне застосування IoT для вузькоспеціалізованої задачі — моніторингу водних екосистем, підтримка платформ за допомогою AI чат-ботів. [15].

Отже, світовий тренд рухається до створення інтелектуальних IoT-платформ, здатних до глибокого аналізу даних за допомогою ШІ. Це доводить актуальність інтеграції подібних підходів, але водночас підкреслює потребу в розробці спеціалізованих алгоритмів, адаптованих до специфіки даних мобільного радіаційного моніторингу, таких як просторова інтерполяція.

Виявлена прогалина в дослідженнях. Аналіз існуючих рішень виявляє чіткий тренд на перехід від статичних систем до інтегрованих мобільних комплексів. Однак, незважаючи на значні успіхи в розробці платформ для збору даних [7, 8] та загальних підходів до їх інтелектуального аналізу [10, 11], залишається недостатньо дослідженою проблема розробки та моделювання спеціалізованих алгоритмів обробки просторово-розподілених даних, отриманих саме з мобільних сенсорів у динаміці. Зокрема, бракує досліджень, присвячених алгоритмам фільтрації, агрегації та просторової інтерполяції для побудови високодеталізованих карт забруднення в режимі реального часу, що і є предметом даної роботи.

Це підтверджує актуальність роботи, яка знаходиться на перетині цих напрямів, зосереджуючись на розробці специфічних алгоритмів обробки даних для систем мобільного моніторингу, що є необхідною ланкою між збором даних та їхньою аналітичною інтерпретацією.

Метою статті є розробка та моделювання комплексної системи обробки та візуалізації екологічних даних, яка включає в себе ефективний алгоритм просторової інтерполяції для даних, отриманих з БПЛА, та архітектуру для передачі й відображення результатів у мобільному додатку.

Для досягнення цієї мети ставляться наступні завдання:

1. Розробка алгоритму, здатного ефективно обробляти просторово-розподілені, нерегулярні дані, що надходять у режимі реального часу від мобільних радіаційних сенсорів, інтегрованих на безпілотні платформи (БПЛА). Цей алгоритм має включати етапи попередньої фільтрації для усунення аномальних значень, агрегації даних з ділянок, що перекриваються, та просторової інтерполяції для перетворення дискретних вимірювань на суцільну поверхню.

2. Моделювання запропонованого алгоритму звикористанням як модельного методу просторової інтерполяції методу зважених обернених відстаней (IDW). Мета моделювання — продемонструвати здатність алгоритму генерувати високо деталізовані цифрові карти радіаційного забруднення (heatmaps) на основі набору сирих, точкових даних.

3. Проєктування архітектури програмного комплексу, що реалізує цей алгоритм, та опис ключових аспектів інтеграції та візуалізації оброблених даних у прототипі мобільного додатку, який слугує інструментом для інтуїтивно зрозумілого інформування та підтримки прийняття рішень.

Результати дослідження

Архітектура системи мобільного моніторингу

Запропонована система мобільного моніторингу побудована за класичною трирівневою клієнт-серверною архітектурою (Рис.1). Така структура дозволяє розділити задачі збору, обробки та візуалізації даних, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та високу продуктивність системи. Архітектура складається з трьох ключових підсистем.

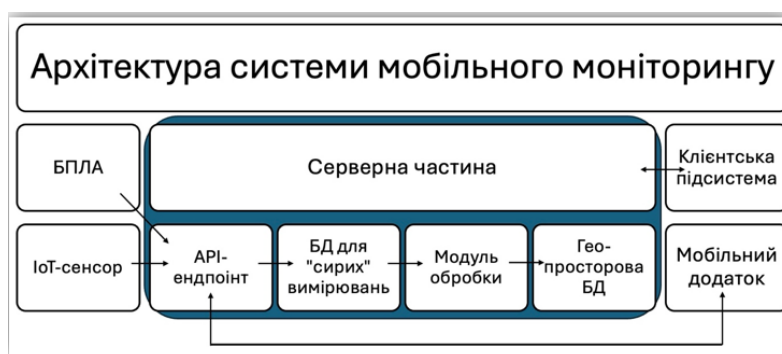


Рис. 1. Архітектура системи мобільного моніторингу

Основним компонентом є автономний безпілотний літальний апарат (БПЛА), оснащений спеціалізованим IoT-сенсором для вимірювання радіаційного фону. Вибір на користь IoT-сенсорів є принциповим, оскільки, на відміну від традиційних дозиметрів, вони мають інтегровані модулі бездротового зв'язку (напр., LoRaWAN, 4G, Wi-Fi) та геолокації (GPS). Це дозволяє автоматично, в режимі реального часу, передавати потік даних — масив точок з координатами, часом та значенням потужності дози — безпосередньо на сервер, що є неможливим при використанні локальних приладів. Ключовими критеріями вибору сенсора для інтеграції на БПЛА є мінімальна вага (до 100 г), енергоефективність та наявність цифрових інтерфейсів для зв'язку з польотним контролером.

Таблиця 1.

Зведена таблиця сенсорів, придатних для використання на БПЛА

	Орієнтовна вага	Точність / Похибка	Швидкість / Формат даних	IoT-пристрій / Можливість інтеграції
LND 712 / СБМ-20	~5-10 г (лише трубка)	Похибка дози: $\pm 20-30\%$ Точність як лічильника: висока	Швидкість: оновлення 1-5 с Формат: електричні імпульси (TTL)	Компонент. Потребує інтеграції з мікроконтролером (напр., ESP32) та модулем зв'язку.
RadiationD v1.1 Kit	~30-50 г (зібраний набір)	Похибка дози: $\pm 20-30\%$	Швидкість: оновлення ~5 с Формат: UART (CPM, мкЗв/год)	Набір для збірки. Готова плата, що спрощує створення IoT-вузла.
Kromek D3S ID	~40 г	Похибка дози: $< 10\%$ Точність ідентифікації: висока	Швидкість: ідентифікація ~2 с Формат: повний спектр, ID нукліду	Так (IoT-модуль). Готовий пристрій з інтерфейсами для інтеграції.



Kromek SIGMA	~50-100 г	Похибка дози: $\pm 10-15\%$	Швидкість: оновлення 1-2 с Формат: UART/SPI (спектр, доза)	Компонент. Високочутливий модуль для інтеграції в системи.
Libelium Plug & Sense	~200-400 г	Похибка дози: $\pm 20-30\%$	Швидкість: передача кожні 1-60 хв Формат: JSON (через LoRaWAN/4G)	Так (IoT-вузол). Готова захищена платформа з різними модулями зв'язку.

Серверна частина є ядром системи, що відповідає за прийом, зберігання та обробку даних. Вона включає:

- API-ендпоінт, який приймає пакети даних від БПЛА через захищені протоколи (HTTP, MQTT).

- Базу даних для "сирих" вимірювань, де зберігаються всі вхідні валідні дані для забезпечення їх цілісності та подальшого аудиту.

- Модуль обробки, який періодично запускає процес перетворення "сирих" даних. Цей модуль реалізує алгоритм просторової інтерполяції (IDW) для генерації суцільних шарів карти забруднення (heatmaps).

- Геопросторову базу даних, де зберігаються вже оброблені геопросторові дані (плитки карти) для швидкого доступу.

Клієнтська підсистема реалізована у вигляді мобільного додатку, який є інструментом взаємодії з кінцевим користувачем. Його основна функція — надання інтуїтивно зрозумілого доступу до результатів моніторингу. Додаток надсилає HTTP-запити до API сервера, вказуючи видиму область карти та масштаб, у відповідь отримує готові плитки теплокарти і відображає їх як шар поверх базової карти (напр., Google Maps).

Взаємодія між компонентами відбувається за двома основними сценаріями. Сценарій збору даних (БПЛА → Сервер): БПЛА збирає дані та безперервно передає їх на серверний API. Сервер валідує та зберігає "сірі" дані, а потім асинхронно обробляє їх, генеруючи шари теплокарти. Сценарій візуалізації даних (Мобільний додаток ↔ Сервер): користувач у додатку переглядає карту. Додаток запитує у сервера вже готові, попередньо оброблені дані для видимої області, що забезпечує миттєвий відгук інтерфейсу.

Така архітектура, що відокремлює важкі обчислення (інтерполяцію) від обслуговування користувацьких запитів, гарантує високу швидкість роботи мобільного додатку та ефективне використання ресурсів.

Методика моделювання просторового розподілу

Етапи попередньої обробки даних

Процес перетворення "сирих" даних від сенсорів на стандартизовані значення починається з реєстрації імпульсів іонізуючого випромінювання. Ці дані можуть включати кількість імпульсів за одиницю часу, енергію кожного імпульсу, час реєстрації, геолокацію. На цьому етапі необхідно відокремити реальні сигнали від фонових чи помилкових, до яких відносять фонове природне випромінювання, електронні перешкоди, механічні вібрації або помилкові імпульси через нестабільність живлення.

Для фільтрації даних встановлюється максимальний поріг енергії, аналізується часова послідовність імпульсів і, якщо імпульси надходять занадто часто або нерівномірно, їх можуть класифікувати як шум. Створюється енергетичний спектр сигналів та відсікаються імпульси, що не відповідають очікуваному спектру. Для



статистичної обробки використовують методи ковзного середнього, медіани, дисперсії, відсікаються аномальні значення, які не вписуються в статистичну модель. Застосування методів машинного навчання (Random Forest, SVM) дозволяє розпізнавати шум на основі історичних даних.

Сучасні пристрої, такі як Kromek D3S або Radiacode, постачаються з заводу вже відкаліброваними, але і їх треба калібрувати, принаймні один раз на рік. По-перше, шляхом порівняння показників сенсора з еталонним джерелом радіації визначається чутливість сенсора. В залежності від типу сенсора, використовують лінійну або нелінійну модель:

для лінійної моделі:

$$\text{Доза} = k * \text{CPS},$$

де k — коефіцієнт калібрування, CPS — імпульси за секунду.

Для нелінійної моделі (для складних спектрів або високих рівнів):

$$\text{Доза} = a * \text{CPS}^b,$$

де: a — масштабний коефіцієнт,

b — степеневий коефіцієнт.

Корекція температури та вологості — теж важливий етап у забезпеченні точності вимірювань сенсора. Якщо на безпілотнику або в корпусі сенсора встановлюються додаткові датчики температури і вологості, що постійно передають значення температури та вологості разом із даними радіаційного сенсора, то типова формула корекції:

$$\text{CPS}_{\text{кор}} = \text{CPS}_{\text{сирі}} \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T - T_0) + \alpha_H \cdot (H - H_0)),$$

де:

T_0, H_0 — еталонні умови калібрування (наприклад, 20°C і 50% RH),

α_T, α_H — емпіричні коефіцієнти температурної та вологості поправки,

$\text{CPS}_{\text{кор}}$ — скориговане значення імпульсів.

Процес об'єднання, узагальнення або згладжування великої кількості сирих даних у більш зручну або інформативну форму, агрегація - невід'ємна частина систем обробки даних в IoT, що забезпечує ефективність, наочність та зменшення навантаження на канали зв'язку, що робить її критично важливою для ефективного функціонування IoT-систем моніторингу. Замість передачі кожного імпульсу, сенсор або контролер обчислює середнє значення CPS за 1, 5 або 60 секунд, максимум/мінімум за певний період, ковзне середнє для згладжування шуму, дані з кількох точок маршруту безпілотника об'єднуються в теплокарти або зони ризику, можлива агрегація за типом джерела (гамма, бета, нейтрони) чи виявлення аномалій або піків і збереження лише цих подій

Деякі сучасні сенсори та IoT-пристрої мають вбудовану систему агрегації. Kromek SIGMA може передавати вже оброблені значення дози, Thermo Scientific RadEye має вбудовану обробку та збереження статистики, Polimaster PM1904 виконує усереднення та зберігає пікові значення, IoT-модулі на базі ESP32 або STM32 — можуть виконувати агрегацію на мікроконтролері перед передачею даних.

Саме цей масив агрегованих та стандартизованих даних і слугує вхідною інформацією для наступного етапу — моделювання просторового розподілу. У рамках даного моделювання, вихідні дані, отримані з БПЛА, вже пройшли етапи апаратної

фільтрації та агрегації на борту, тому основна увага була зосереджена на подальшій статистичній очистці та просторовій інтерполяції.

Методика просторової інтерполяції та моделювання

Існує декілька алгоритмів просторової інтерполяції, які підійдуть для моделювання просторового розподілу забруднення.

Метод зважених обернених відстаней (Inverse Distance Weighting, IDW) - один з найпоширеніших методів інтерполяції просторових даних, що використовується для оцінки значення в точці, де немає вимірювання, базуючись на значеннях сусідніх точок. Метод використовується для великих територій з неоднорідним розподілом точок, коли важлива точність похибки та потрібно враховувати фізичні бар'єри. Значення у невідомій точці обчислюється як зважене середнє значень сусідніх точок, де вага обернено пропорційна відстані до кожної точки

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i},$$

де:

$Z(x_0)$ — шукане значення в точці x_0 ,

$Z(x_i)$ — значення в точці x_i ,

p — степінь впливу (зазвичай $p = 2$),

$$w_i = \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}$$

— вага, обернена до відстані d між точками.

На Рис. 2 представлена візуалізація методу IDW для різних значень степеневого коефіцієнта p , де червоні точки - умовні точки вимірювання з відомими значеннями, теплокарта показує інтерпольовані значення між точками, де колір відповідає рівню опадів. Чим ближче точка, тим більший її вплив на значення в конкретному місці. Зі збільшенням p метод стає чутливішим до близьких точок, що може бути корисно для виявлення локальних аномалій, але менш ефективно для глобального згладжування [13].

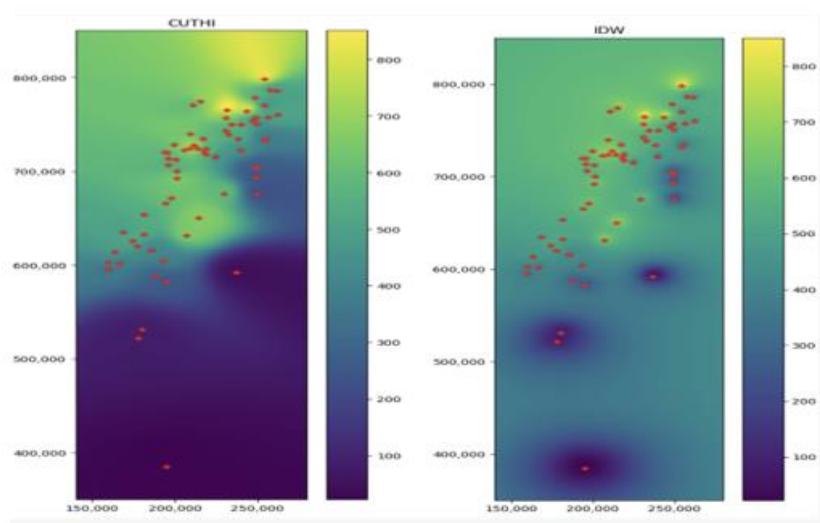


Рис.2. Інтерполяційні карти тестового випадку опадомірів з використанням IDW (права панель) та CUTHI (ліва панель)[13]

Метод зважених обернених відстаней IDW не потребує складних обчислень, але не враховує тренди та може мати “ефект бичачого ока” - створювати концентричні кола навколо точок вимірювань, що не завжди реалістично. Цей метод доцільно використовувати для створення карт, коли дані щільні та рівномірно розподілені, та коли швидкість є пріоритетом. Коефіцієнт p підбирається шляхом емпіричного тестування.

Крігінг - метод інтерполяції геопросторових даних, який дозволяє оцінити значення просторової змінної в точках де немає вимірювань, з урахуванням статистичних властивостей даних та просторової кореляції. Суть метода полягає в тому, що зважуються сусідні точки за відстанню, так як в IDW, та враховується, як сильно пов'язані значення між собою, та структура просторової варіації:

$$z_K(X_e) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} z(X_{\alpha})$$

де:

де ω_{α} – невідома вага для виміряного значення в α -му місці.

X_{α} — положення в n точках ($\alpha = 1, 2, 3, \dots, n$),

$z(X_{\alpha})$ — виміряне значення в X_{α} .

X_e — положення, де отримано оцінений результат $z(X_e)$

На Рис. 3 представлено приклад інтерполяції показника заломлення атмосфери методом крігінгу з використанням чотирисезонних даних, де червоними кружечками позначено точки вимірювання з відомими значеннями, теплокарта - це результат інтерполяції [14].

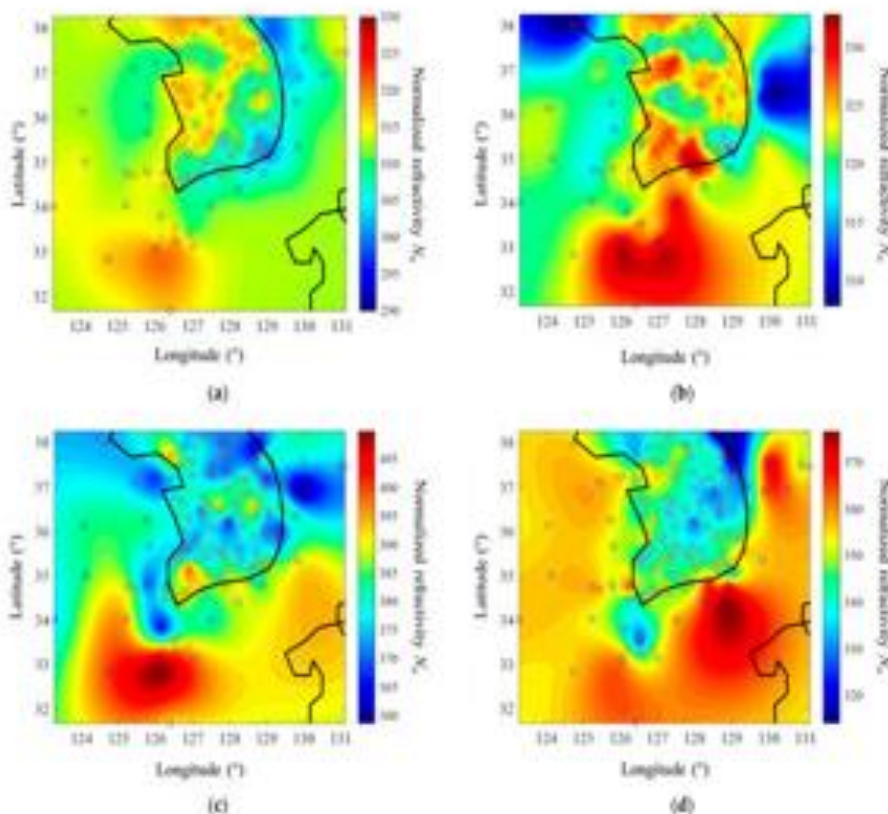


Рис. 3. Інтерполяція методом крігінгу [14]



До переваг метода можна віднести плавні переходи між зонами, врахування трендів і шуму та можливість оцінки похибки. До недоліків можна віднести складність реалізації, високі обчислювальні витрати, чутливість до параметрів варіограми, потреба в достатній кількості даних та припущення про стаціонарність. Його найкраще використовувати для фінальних наукових розрахунків, де точність та обґрунтованість є найвищим пріоритетом.

Метод інтерполяції сплайн створює гладку поверхню, яка проходить точно через усі точки вимірювань, мінімізуючи при цьому її загальну кривизну. Він створює ідеально плавні поверхні і завжди правильно показує значення вимірюваних точок, але може створювати "піки" та "провали" в місцях, де мало даних або де вони різко змінюються. Інтерполяція сплайн найкраще підходить для вимірювання фоновому рівня радіації.

Метод природного сусіда полягає в тому, що для розрахунку значення в невідомій точці він знаходить найближчих сусідів, але ваги присвоює на основі того, яку "частку площі" кожен сусід "віддає" невідомій точці. Метод ефективний, коли дані скупчені нерівномірно та не екстраполює значення за межі діапазону вихідних даних. До недоліків можна віднести його складність реалізації.

У таблиці 2 представлено узагальнення порівняльного аналізу методів інтерполяції, які підійдуть для моделювання просторового розподілу забруднення території.

Таблиця 2

Порівняння методів інтерполяції для моделювання просторового розподілу забруднення території.

Алгоритм	Швидкість	Складність	Точність	Карта похибок	Найкраще застосування
IDW	Висока	Низька	Середня	Ні	Прототипування, мобільні додатки
Крігінг	Низька	Висока	Висока	Так	Наукові дослідження, фінальний аналіз
Сплайн	Середня	Середня	Середня-висока	Ні	Моделювання гладких поверхонь
Природний сусід	Середня	Середня	Висока	Ні	Нерівномірні, кластеризовані дані

На основі аналізу та порівняння методів геопросторової інтерполяції для моделювання алгоритму опрацювання геопросторових даних забруднення території автори вибрали метод зважених обернених відстаней IDW, який добре передає **локальні варіації**, що критично для карт забруднення, де навіть невеликі зміни мають значення. Метод не згладжує дані надмірно, як це може робити, наприклад, крігінг. IDW не вимагає нормальності, стаціонарності чи варіограм — на відміну від геостатистичних методів, що важливо при роботі з реальними польовими даними. IDW легко інтегрується в інтерактивні карти, дозволяє швидко перебудовувати сітку, змінювати параметри. На рис. 4 представлено алгоритм роботи метода зважених обернених відстаней.

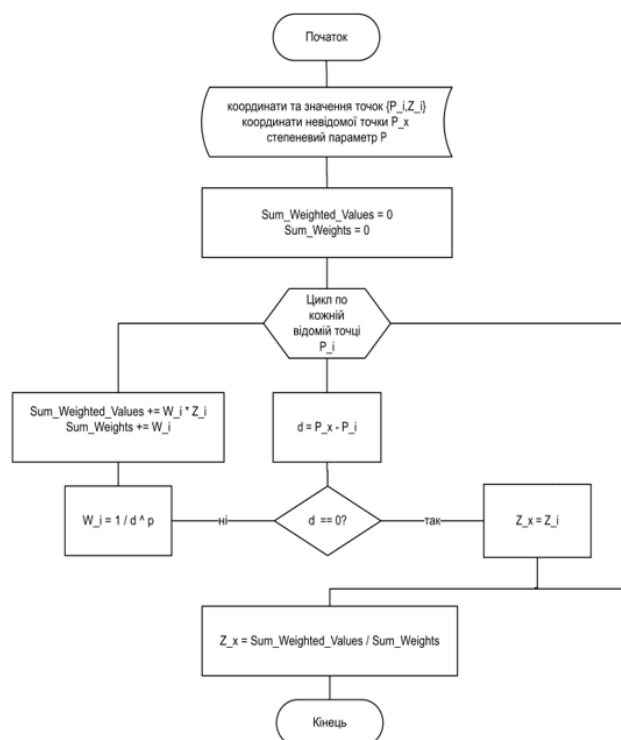


Рис. 4. Алгоритм роботи метода зважених обернених відстаней

Об'єктом дослідження була локальна ділянка, розташована в межах Чорнобильської зони відчуження. Географічні координати території, що знаходяться в діапазоні 51.41° північної широти та 30.07° східної довготи, вказують на безпосередню близькість до промислового майданчика ЧАЕС. Збір вихідних даних було здійснено методом дистанційного аерогамма-спектрометричного сканування з використанням безпілотного літального апарату (БПЛА). Вимірювання проводились вздовж заздалегідь визначених маршрутів, що забезпечило систематичне покриття досліджуваної площі.

Було проскановано 10 треків та зчитано 10 окремих CSV-файлів, кожен з яких відповідає окремому маршруту обльоту БПЛА. Створено єдину структуру даних (дані файлів об'єднано), з додатковим полем для ідентифікації маршруту. Приведено назви колонок до уніфікованого формату. Приведено числові значення до float з фіксованою точністю. Перевірено розподіл координат — виявлено достатню варіативність для побудови просторової сітки. Визначено діапазон значень Cs137 для подальшого кольорового кодування. Визначено аномальні точки за статистичними критеріями. Нульові координати $X = 0$ та $Y = 0$ та точки, координати яких виходили за межі території обльоту та не мають географічного змісту, було видалено з усіх маршрутів. Після очищення залишилось 3726 валідних точок з усіх 10 маршрутів.

Для наочної демонстрації характеру забруднення була застосована відносна кольорова класифікація, що дозволяє ідентифікувати зони з низькою (зелений), середньою (жовтий) та аномально високою (помаранчевий, червоний) активністю.

Для моделювання було обрано мову програмування Python з використанням бібліотек: numpy — для обчислення відстаней, wag, матричних операцій, pandas — для зчитування, об'єднання, фільтрації даних, matplotlib — для побудови статичних контурних карт.

Результати моделювання та їх обговорення

На етапі моделювання перетворено набір розрізнених точок на неперервну поверхню забруднення. Результати моделювання просторового розподілу радіаційного фону Цезію 137 на основі даних, отриманих системою мобільного моніторингу представлені на тепловій карті Рис.5. Кольорова шкала відображає потужність еквівалентної дози (в умовних одиницях). На карті візуалізуються зони зі стабільно підвищеним природним фоном.

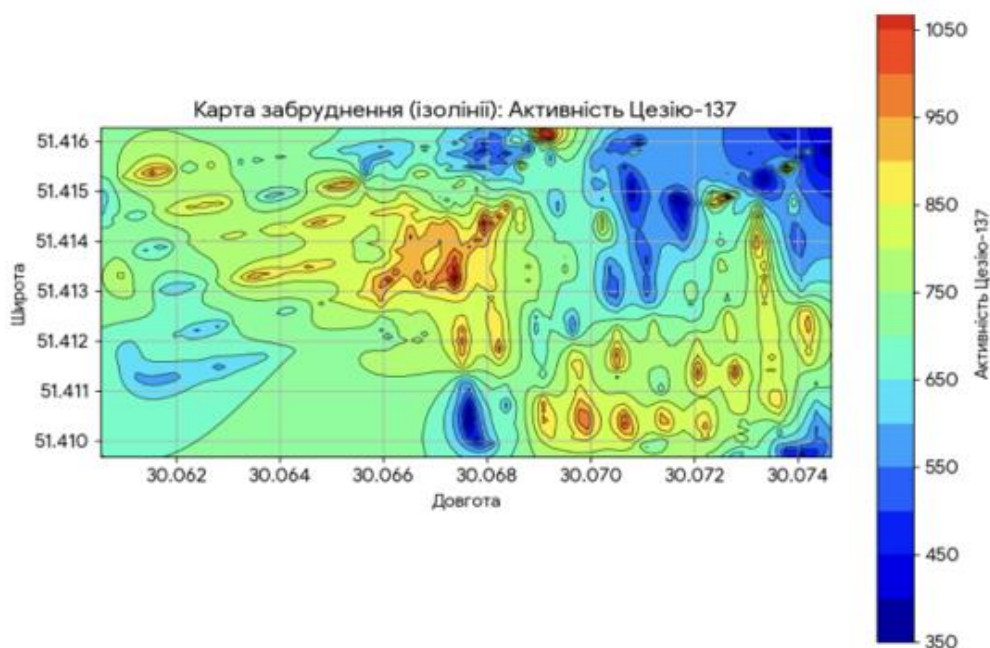


Рис.5. Результат моделювання просторового розподілу активності Цезію 137 на основі даних, отриманих системою мобільного моніторингу. Теплокарта, згенерована за допомогою на Python і є результатом просторової інтерполяції даних за методом IDW з використанням бібліотек numpy та matplotlib.

Для верифікації коректності реалізації алгоритму IDW на Python, було проведено порівняльне моделювання того ж набору даних з використанням вбудованого інструменту IDW Interpolation в середовищі QGIS. Візуалізація отриманої поверхні, виконана в середовищі QGIS, представлена на Рис. 6. Колірна шкала відображає відносну активність Цезію-137, де зелені та блакитні відтінки відповідають зонам з низьким рівнем активності, а жовті та червоні — зонам з локальними максимумами ("гарячим точкам"). Для кількісної оцінки розподілу на карту також нанесені ізолінії, що дозволяють точно визначити межі зон з однаковим рівнем забруднення.

Візуальний аналіз результатів, а також розташування та кількість ключових локальних максимумів та мінімумів показали високий ступінь їх ідентичності, що підтверджує коректність роботи реалізованого на Python алгоритму IDW та достовірність отриманих результатів моделювання. Отже, запропонований підхід дозволяє отримувати достовірні та репрезентативні результати.

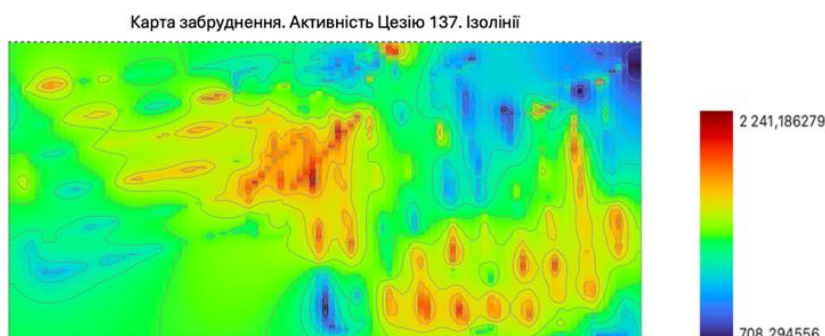


Рис.6. Теплокарта просторового розподілу активності Cs-137. Візуалізацію, растрезацію та оформлення результатів проведено в середовищі QGIS.

Водночас слід зазначити обмеження обраного методу IDW, хоч і є обчислювально швидким, що критично для систем мобільного моніторингу, може створювати артефакти типу "бичачого ока" за умови рідкого розташування точок. Однак, при високій щільності даних, отриманих з БПЛА, цей ефект мінімізується, що і підтверджують отримані результати.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У ході дослідження було розроблено та змодельовано комплексний алгоритм обробки екологічних даних, призначений для використання в системах мобільного моніторингу на базі БПЛА. Проаналізовано існуючі підходи до екологічного моніторингу, що виявило нішу для створення гнучких, високодеталізованих систем, здатних долати обмеження традиційних стаціонарних мереж. Обґрунтовано вибір методу просторової інтерполяції. На основі порівняльного аналізу чотирьох поширених методів (IDW, Кригінг, Сплайн, Природний сусід) для вирішення поставленої задачі було обрано метод зважених обернених відстаней (IDW) як оптимальний за співвідношенням точності, швидкості та простоти реалізації. Розроблено та реалізовано модель обробки даних, що включає етапи агрегації, попередньої обробки та просторової інтерполяції за алгоритмом IDW. Практичним результатом моделювання стало створення деталізованої карти-теплокарти просторового розподілу активності Цезію-137. Проведено валідацію моделі шляхом порівняння отриманої карти із картою, розробленою на базі QGIS. Аналіз показав, що конфігурація зон забруднення, а також розташування локальних максимумів та мінімумів на згенерованій карті практично ідентичні еталонним. Це підтверджує високу ефективність та валідність обраного алгоритмічного ланцюжка "очищення даних → IDW-інтерполяція → візуалізація" для даного набору даних. Запропоновано та обґрунтовано архітектуру системи "БПЛА-сервер-мобільний додаток", яка є оригінальним рішенням, що заповнює прогалину між професійними, закритими системами моніторингу та потребою в оперативному інформуванні широкого кола користувачів. Це підтверджує, що розроблений підхід є не лише валідною моделлю обробки даних, а й життєздатною концепцією для створення сучасних екологічних сервісів. Перспективним напрямком подальших досліджень є застосування більш складних геостатистичних методів (наприклад, крігінгу) або алгоритмів машинного навчання для інтерполяції. Це потенційно може підвищити точність моделювання, хоч і вимагатиме значно більших обчислювальних ресурсів, що може бути невиправданим для задач оперативного моніторингу в реальному часі.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abramov, V., Astafieva, M., Boiko, M., Bodnenko, D., Bushma, A., Vember, V., Hlushak, O., Zhyltsov, O., Ilich, L., Kobets, N., Kovaliuk, T., Kuchakovska, H., Lytvyn, O., Lytvyn, P., Mashkina, I., Morze, N., Nosenko, T., Proshkin, V., Radchenko, S., ... Yaskevych, V. (2021). Theoretical and practical aspects of the use of mathematical methods and information technology in education and science. <https://doi.org/10.28925/9720213284km>
2. Platonenko, A., Sokolov, V., Skladannyi, P., Anosov, A., & Oleksiienko, H. (2021). Comparison of Modern Technical Means of Air Intelligence to Ensure the Security of the Controlled Zone. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 1(13), 170–182. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.13.170182>
3. Dovzhenko, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, Y., & Zhyltsov, O. (2025). A Dynamic Interaction Model of Unmanned Aerial Vehicles with a Sensor Network for Energy-Efficient Monitoring. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(27), 466–478. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.766>
4. Barabash, O., Ausheva, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, Y., & Dovzhenko, N. (2024). Technical Aspects of Building a Fault-Tolerant Sensor Network Infrastructure. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(24), 185–195. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.185195>
5. Platonenko, A., Sokolov, V., Skladannyi, P., & Oleksiienko, H. (2021). Technical Means of Airintelligence to Ensure the Physical Security of Information Activities. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(12), 143–150. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.143150>
6. Bakharyev, V. S., & Marenych, A. V. (2016). Analytical review of research results on environmental monitoring problems in Ukraine. *Ekologichna bezpeka*, (2(22)), 35–42.
7. Volynets, T. V. (2024). Information systems for mobile monitoring of marine areas and coastal zones. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*, (4(85)), 53–55.
8. Trysniuk, V. M., Okhariev, V. O., Trysniuk, T. V., Smetanin, K. V., Holovan, Yu. M., & Kurylo, A. V. (2024). Improvement of the mobile environmental monitoring system. *Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence*, 178–182.
9. Trysniuk, V. M., Zorin, D. O., & Volynets, T. V. (2024). Information systems for mobile environmental monitoring of the Dniester Canyon. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*, (2). <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.027280>
10. Bohaychuk, P., Rudnichenko, M. D., & Otradska, T. V. (2024). Development of an information system for environmental data analysis based on machine learning. *Education and Science of Today: Intersectoral Issues and Development of Sciences*, Section 18: Information Technologies and Systems, 206–209. <http://logos-science.com>
11. Panduman, Y. Y. F., Funabiki, N., Fajrianti, E. D., Fang, S., & Sukaridhoto, S. (2024). A survey of AI techniques in IoT applications with use case investigations in the smart environmental monitoring and analytics in real-time IoT platform. *Information*, 15(3), 153. <https://doi.org/10.3390/info15030153>
12. Veda, P., Ranganathan, C. S., Santhuja, P., Mohankumar, N., Meenakshi, R., & Naganathan, S. B. T. (2024). Aquatic conservation monitoring for river and lake ecosystems with IoT and cloud computing. In *Proceedings of the 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 874–879). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSP60870.2024.10544340>
13. Benmoshe, N. (2024). A simple solution for the inverse distance weighting interpolation (IDW) clustering problem. *Sciences*, 7(1), 30. <https://doi.org/10.3390/sci7010030>
14. Jang, D., Kim, N., & Choo, H. (2024). Kriging interpolation for constructing database of the atmospheric refractivity in Korea. *Remote Sensing*, 16(13), 2379. <https://doi.org/10.3390/rs16132379>
15. Mashkina, I., Nosenko, T., Hlushak, O., Spivak, S., & Bilous, V. (2025). Optimizing Customer Support with AI Chatbots: A Case Study. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(28), 727–739. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.838>

**Tetiana Nosenko**

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Computer Science
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-7597-9861
t.nosenko@kubg.edu.ua

Iryna V. Mashkina

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Computer Science
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0003-0667-5749
i.mashkina@kubg.edu.ua

MODELING OF ENVIRONMENTAL DATA PROCESSING FOR MOBILE MONITORING SYSTEMS BASED ON UAVS AND THE IDW METHOD

Abstract: In the context of increasing technogenic risks and the need for rapid response to radiation-related emergencies, mobile environmental monitoring systems are becoming a critical component of national safety and public health protection. This article presents a comprehensive approach to modeling the processing of spatially distributed environmental data collected by unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with IoT-based radiation sensors. The proposed system architecture is based on a three-tier client-server model that separates data acquisition, processing, and visualization tasks. The UAV platform integrates lightweight, energy-efficient IoT sensors capable of real-time data transmission, including geolocation and radiation dose measurements. The core contribution of this research lies in the development of a data processing algorithm tailored for dynamic, irregularly spaced measurements. The algorithm includes noise filtering, temporal and spatial aggregation, and spatial interpolation using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. The IDW technique was selected for its simplicity, transparency, and high sensitivity to local variations, making it suitable for generating detailed heatmaps of radioactive contamination. The modeling process demonstrates the algorithm's ability to transform raw sensor data into continuous contamination surfaces, enabling intuitive interpretation and decision-making. Additionally, the article outlines the integration of the algorithm into a mobile application interface, which provides users with interactive access to processed data layers. The application retrieves pre-rendered heatmap tiles from the server based on the user's viewport and zoom level, ensuring fast and responsive visualization. The system's modular design allows for scalability and adaptation to various environmental monitoring scenarios. The research highlights the importance of combining UAV mobility, IoT sensor intelligence, and spatial modeling to overcome limitations of traditional monitoring systems. It also identifies future directions for enhancing interpolation accuracy through machine learning methods and expanding the system's applicability to other types of environmental hazards.

Keywords: environmental monitoring; IoT sensors; IDW; interpolation; heatmap; client-server architecture.

REFERENCES

1. Abramov, V., Astafieva, M., Boiko, M., Bodnenko, D., Bushma, A., Vember, V., Hlushak, O., Zhyltsov, O., Ilich, L., Kobets, N., Kovaliuk, T., Kuchakovska, H., Lytvyn, O., Lytvyn, P., Mashkina, I., Morze, N., Nosenko, T., Proshkin, V., Radchenko, S., ... Yaskevych, V. (2021). Theoretical and practical aspects of the use of mathematical methods and information technology in education and science. <https://doi.org/10.28925/9720213284km>
2. Platonenko, A., Sokolov, V., Skladannyi, P., Anosov, A., & Oleksiienko, H. (2021). Comparison of Modern Technical Means of Air Intelligence to Ensure the Security of the Controlled Zone. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 1(13), 170–182. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.13.170182>
3. Dovzhenko, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, Y., & Zhyltsov, O. (2025). A Dynamic Interaction Model of Unmanned Aerial Vehicles with a Sensor Network for Energy-Efficient Monitoring. *Electronic*



- Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(27), 466–478. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.766>
4. Barabash, O., Ausheva, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, Y., & Dovzhenko, N. (2024). Technical Aspects of Building a Fault-Tolerant Sensor Network Infrastructure. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(24), 185–195. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.185195>
 5. Platonenko, A., Sokolov, V. ., Skladannyi, P., & Oleksiienko, H. (2021). Technical Means of Airintelligence to Ensure the Physical Security of Information Activities. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(12), 143–150. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.143150>
 6. Bakharyev, V. S., & Marenych, A. V. (2016). Analytical review of research results on environmental monitoring problems in Ukraine. *Ekologichna bezpeka*, (2(22)), 35–42.
 7. Volynets, T. V. (2024). Information systems for mobile monitoring of marine areas and coastal zones. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*, (4(85)), 53–55.
 8. Trysniuk, V. M., Okhariev, V. O., Trysniuk, T. V., Smetanin, K. V., Holovan, Yu. M., & Kurylo, A. V. (2024). Improvement of the mobile environmental monitoring system. *Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence*, 178–182.
 9. Trysniuk, V. M., Zorin, D. O., & Volynets, T. V. (2024). *Information systems for mobile environmental monitoring of the Dniester Canyon. Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*, (2). <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.027280>
 10. Bohaychuk, P., Rudnichenko, M. D., & Otradska, T. V. (2024). Development of an information system for environmental data analysis based on machine learning. *Education and Science of Today: Intersectoral Issues and Development of Sciences*, Section 18: Information Technologies and Systems, 206–209. <http://logos-science.com>
 11. Panduman, Y. Y. F., Funabiki, N., Fajrianti, E. D., Fang, S., & Sukaridhoto, S. (2024). A survey of AI techniques in IoT applications with use case investigations in the smart environmental monitoring and analytics in real-time IoT platform. *Information*, 15(3), 153. <https://doi.org/10.3390/info15030153>
 12. Veda, P., Ranganathan, C. S., Santhuja, P., Mohankumar, N., Meenakshi, R., & Naganathan, S. B. T. (2024). Aquatic conservation monitoring for river and lake ecosystems with IoT and cloud computing. In *Proceedings of the 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 874–879). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSP60870.2024.10544340>
 13. Benmoshe, N. (2024). A simple solution for the inverse distance weighting interpolation (IDW) clustering problem. *Sciences*, 7(1), 30. <https://doi.org/10.3390/sci7010030>
 14. Jang, D., Kim, N., & Choo, H. (2024). Kriging interpolation for constructing database of the atmospheric refractivity in Korea. *Remote Sensing*, 16(13), 2379. <https://doi.org/10.3390/rs16132379>
 15. Mashkina, I., Nosenko, T., Hlushak, O., Spivak, S., & Bilous, V. (2025). Optimizing Customer Support with AI Chatbots: A Case Study . *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(28), 727–739. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.838>

