

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування факультету)

Кафедра екології

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗАСОБІВ ПРОВЕДЕННЯ
ДИСТАНЦІЙНИХ ПОЛЬОВИХ
ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

спеціальність

101 Екологія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма

«Екологія»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕОСм - 21

Домбровський Андрій
Анатолійович

_____ (підпис)

Керівник:

к.геогр.н., доцент

Федонюк Микола Ананійович

_____ (підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

к.геогр.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Федонюк Микола Ананійович

_____ (підпис)

Луцьк – 2025 рік

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аграрних технологій та екології

Кафедра екології

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 101 Екологія

Освітня програма: «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____

2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Домбровському Андрію Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: модернізація засобів проведення дистанційних польових екологічних досліджень

Керівник роботи: Федонюк Микола Ананійович, к. геогр. н., доцент

затверджені наказом закладу вищої освіти від «_04_» лютого__ 2025 р. №_62/01-02_

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «_01_» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: літературні джерела, статистична та довідкова література, специфікація БПЛА DJI Phantom 4, результати власних інструментальних досліджень та обстежень.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити): 1) Особливості дистанційних екологічних досліджень 2) Аналіз літературних даних щодо використання БПЛА для моніторингу довкілля. 3) Розробка системи моніторингу радіаційного фону за допомогою БПЛА 4) Апробація розробленої системи моніторингу 5) Висновки та рекомендації.

5. Перелік графічного матеріалу: 1. Приклади використання БПЛА для моніторингу довкілля. 2. Схема пристосувань для встановлення сенсорів на БПЛА. 3. Ілюстрації розробленої системи моніторингу. 4. Фотографії тестових польотів 5. Ілюстрації процесу обробки отриманих даних.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 04 » 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вибір та обґрунтування теми</i>	<i>Січень – Лютий 2025</i>	
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>Лютий – Квітень 2025</i>	
3.	<i>1 розділ</i>	<i>Квітень - Травень 2025</i>	
4.	<i>2 розділ</i>	<i>Травень – Вересень 2025</i>	
5.	<i>3 розділ</i>	<i>Вересень – Жовтень 2025</i>	
6.	<i>Висновки та пропозиції</i>	<i>Жовтень – Листопад 2025</i>	
7.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>Жовтень 2025</i>	
8.	<i>Формування додатків</i>	<i>Листопад 2025</i>	
9.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>Листопад 2025</i>	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>Листопад 2025</i>	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>До 01.12.2025</i>	
12.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	<i>15.12.2025</i>	

Здобувач вищої освіти _____ (_____)
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ (_____)
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Домбровський А.А. Модернізація засобів проведення дистанційних польових екологічних досліджень. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Екологія» спеціальності 101 Екологія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з 3 розділів, вступу, висновків, переліку посилань.

Об'єктом даного дослідження є методи та форми проведення дистанційного екологічного моніторингу із використанням безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА).

Предметом дослідження були види, форми та методи впровадження застосування БПЛА у екологічному моніторингові в світі та в Україні, особливості і передумови організації системи дистанційного моніторингу параметрів навколишнього природного середовища.

Методи наукового дослідження, які були застосовані при виконанні кваліфікаційної роботи магістра: збір та узагальнення наукової та статистичної інформації, аналітичні та оціночні методи, статистично-математичні і графічні методи, методи моделювання, прогнозування і вивчення особливостей екологічного стану території у контексті передумов для організації і розвитку екологічного моніторингу, наукові методи порівняння і аналогії, методи аналізу та співставлення літературних даних щодо перспектив оптимізації дистанційних методів відстеження стану довкілля, які досліджувалися, та практичних форм впровадження у регіоні та у громаді новітніх методів екомоніторингу.

Результати виконання кваліфікаційної роботи магістра: проаналізовано методологічні засади, наукову вивченість та аналіз сучасного стану розвитку застосування безпілотних літальних апаратів для

потреб екологічного моніторингу у світі, зокрема, в країнах Європейського Союзу, в Україні та не теренах України; зібрано і узагальнено статистичні, аналітично-описові та графічні матеріали, які дозволяють охарактеризувати технічне і фахове забезпечення проведення і організації такого моніторингу.

У роботі було запропоновано додаткове оснащення квадрокоптера DJI Phantom4 приладами для здійснення теплового та радіометричного моніторингу, які є досить актуальними в умовах сучасних антропогенних впливів на довкілля. Через специфічну аеродинамічну форму та численні датчики перешкод прикріплення додаткового обладнання до квадрокоптера вимагало нових технічних підходів, які були запропоновані. Було розроблено та виготовлено на 3Д принтері спеціальне кріплення з фіксаторами, у яке приєднано тепловізійний пристрій. Для цього для кишенькової тепловізійної камери подали живлення від батареї через USB, підєднали відео передавач частотою 5,8ГГц з передавальною антеною та декодером цифрового сигналу в аналоговий. Сигнал від такої системи зчитується будь-яким відповідним додатком типу USB-camera. Було протестовано підвіс дозиметра-радіометра до БПЛА для проведення радіометричних вимірювань. В цьому випадку не передбачена передача даних, але ця модель дозиметра записує виміряні значення у внутрішню пам'ять щосекунди із зазначенням точного часу. Після польоту дані переносяться на комп'ютер, а час співставляється із польотними точками по відео зі штатної камери дрона. Тестові випробування проводили на території ЛНТУ. Спочатку випробували керуваність БПЛА із таким підвісом на різних висотах. В цілому дрон стабілізувався добре, але дещо більше звичайного розхитувався при поривах вітру. Самі точки вимірювань визначили заздалегідь із кроком у 30-40м. Після польоту через спеціалізовану програму GMC Data Viewer завантажувалися отримані дані у форматі csv. Потім ці дані відформатовувалися в Excel та

співвідносилися по часу із відповідними точками обльоту. На основі цих даних було збудовано ряд екологічних карт у програмі Surfer, які допомагають виявити просторові закономірності розподілу екологічних значень. Використання дронів при вимірюваннях такого типу суттєво економить час та дозволяє провести заміри у важкодоступних місцях та зонах.

Ключові слова: екологічний моніторинг, безпілотний літальний апарат, дистанційні методи моніторингу довкілля, тепловізор, дозиметр.

ANNOTATION

Dombrovsky A.A. Modernization of means of conducting remote field ecological research. Manuscript.

Qualification work of the master of EP "Ecology" specialty 101 Ecology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's thesis consists of 3 sections, introduction, conclusions, list of references.

The object of this study is the methods and forms of conducting remote environmental monitoring using unmanned aerial vehicles (hereinafter referred to as UAVs).

The subject of the study was the types, forms and methods of implementing the use of UAVs in environmental monitoring in the world and in Ukraine, the features and prerequisites for organizing a system of remote monitoring of environmental parameters. The methods of scientific research that were used in the performance of the master's qualification work: collection and generalization of scientific and statistical information, analytical and evaluation methods, statistical-mathematical and graphical methods, methods of modeling, forecasting and studying the features of the ecological state of the territory in the context of the prerequisites for organizing and developing environmental monitoring, scientific methods of comparison and analogy, methods of analysis and comparison of literary data regarding the prospects for optimizing the remote methods of monitoring the state of the environment that were studied, and practical forms of implementing the latest methods of ecomonitoring in the region and in the community.

Results of the master's qualification work: the methodological principles, scientific study and analysis of the current state of development of the use of unmanned aerial vehicles for the needs of environmental monitoring in the world, in particular, in the countries of the European Union, in Ukraine and

outside Ukraine were analyzed; statistical, analytical-descriptive and graphic materials were collected and summarized, which allow characterizing the technical and professional support for conducting and organizing such monitoring.

The work proposed additional equipment for the DJ1 Phantom4 quadcopter with devices for thermal and radiometric monitoring, which are quite relevant in the conditions of modern anthropogenic impacts on the environment. Due to the specific aerodynamic shape and numerous obstacle sensors, attaching additional equipment to the quadcopter required new technical approaches, which were proposed. A special mount with clamps was developed and manufactured on a 3D printer, into which a thermal imaging device is attached. To do this, the pocket thermal imaging camera was powered by a battery via USB, a 5.8 GHz video transmitter with a transmitting antenna and a digital-to-analog signal decoder were connected. The signal from such a system is read by any appropriate USB-camera-type application. The suspension of a dosimeter-radiometer to a UAV for conducting radiometric measurements was tested. In this case, data transmission is not provided, but this model of dosimeter records measured values in the internal memory every second with an indication of the exact time. After the flight, the data is transferred to a computer, and the time is compared with the flight points from the video from the drone's regular camera. Tests were carried out on the territory of LNTU. First, the controllability of the UAV with such a suspension was tested at different heights. In general, the drone stabilized well, but swayed a little more than usual during gusts of wind. The measurement points themselves were determined in advance with a step of 30-40 m. After the flight, the obtained data was downloaded in csv format through the specialized GMC Data Viewer program. Then, this data was formatted in Excel and correlated in time with the corresponding points of the flight. Based on this data, a number of ecological maps were constructed in the Surfer program, which help to identify

spatial patterns of the distribution of ecological values. The use of drones in measurements of this type significantly saves time and allows measurements to be taken in hard-to-reach places and areas.

Keywords: ecological monitoring, unmanned aerial vehicle, remote methods of environmental monitoring, thermal imager, radiation meter.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

- 1.1. Типи сенсорів для моніторингу забруднення
- 1.2. Обробка даних сенсорів.
- 1.3. Переваги та обмеження використання БПЛА для моніторингу

РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ВІДОМИХ ПРИКЛАДІВ ЗАСТОСУВАННЯ.

- 2.1. Приклади застосування у міських та промислових районах
- 2.2. Приклади застосувань для відбору проб води.
- 2.3. Приклади відбору проб повітря

РОЗДІЛ 3. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ та РАДІОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

- 3.1. Розробка кріплень для пристроїв під БПЛА DJ1 Phantom4.
- 3.2. Проведення тепловізійних досліджень.
- 3.3. Тестові польоти з радіометром
- 3.4. Обробка отриманих даних.

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

ВСТУП

Актуальність теми. Польові екологічні дослідження досі залишаються незамінними у багатьох галузях моніторингу довкілля. Отримання безпосередніх показників, що характеризують різні компоненти навколишнього середовища, важливі для різних природних та техногенних систем, та особливо для заповідних територій. Разом з тим, реальні польові дослідження вимагають значних затрат часу, коштів і праці. Крім того, багато територій є малодоступними для безпосереднього вивчення чи відбору зразків.

Супутниковий моніторинг частково допомагає заповнити ці прогалини. Завдяки космічному зондуванню зараз можна визначати температуру поверхні, стан рослинності, вміст вологи, навіть вміст окремих забруднюючих компонентів у повітрі. Але при цьому є і багато обмежень – мала роздільна здатність, нечасті обльоти, висока вартість та складність обладнання.

Широке використання безпілотників дозволяє знаходити рішення, які можуть полегшити такі дослідження. Є приклади застосування БПЛА не тільки для зйомки місцевості, але й для відбору зразків, проб, чи вимірювання забрудненості атмосфери.

Мета роботи – на основі аналізу відомих даних щодо застосування БПЛА розробити прикладні рішення для моніторингу окремих компонентів довкілля (на базі наявного на факультеті БПЛА Phantm4).

Для досягнення поставленої виконувались такі *завдання*:

- проаналізувати світовий досвід використання БПЛА для екологічного моніторингу;
- охарактеризувати окремі приклади застосування для моніторингу атмосфери та водних об'єктів;
- розробити та апробувати системи моніторингу теплового поля і радіаційного фону за допомогою БПЛА.

Об'єкт дослідження – безпілотні апарати, *предмет дослідження* – можливості та особливості їх застосування для окремих ввидів польових екологічних досліджень.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел, порівняльний аналіз існуючих технічних рішень, комп'ютерне моделювання, 3Д-друк, польові дослідження, картографічний метод. Під час виконання кваліфікаційної роботи було частково використано інструменти LLM виключно для редагування і форматування тексту теоретичних розділів і як допоміжний засіб для уточнення формулювань та опрацювання іноземних літературних джерел. Усі основні результати, твердження, висновки належать автору і ґрунтуються на власних дослідженнях та аналізі.

Практичне значення роботи полягає у розробленні конкретних технічних рішень, які дозволяють застосовувати окрему модель БПЛА для дистанційних вимірювань радіаційного фону та тепловізійних обстежень..

Структура роботи: вступ, три розділи, висновки, перелік джерел посилання. Загальний обсяг роботи становить ____ сторінок.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності, що призводить до передчасної смертності, хронічних захворювань і значних соціально-економічних втрат у всьому світі. Традиційні методи моніторингу, такі як стаціонарні наземні станції, мають обмеження щодо просторового охоплення, оперативності та доступу до важкодоступних районів. У цьому контексті безпілотні літальні апарати (БПЛА) відкривають нові можливості для екологічного моніторингу, забезпечуючи мобільність, гнучкість, швидку реакцію та можливість збору даних у реальному часі навіть у складних географічних умовах.

У цьому розділі розглядаються сучасні наукові та технічні дослідження щодо використання БПЛА для моніторингу забруднення атмосферного повітря, з акцентом на типи сенсорів, принципи їх роботи, точність, вагу та енергоспоживання, переваги й обмеження технології, приклади успішного застосування, технічні виклики, перспективи розвитку, нормативні та етичні аспекти, а також економічну ефективність.

1.1. Типи сенсорів для моніторингу забруднення

Основні типи сенсорів. БПЛА для моніторингу атмосферного повітря можуть бути оснащені різноманітними сенсорами, які дозволяють виявляти як газоподібні, так і тверді забруднювачі. Найбільш поширені типи сенсорів:

- Електрохімічні сенсори (C, Nx, S2, 3, H2S, VC)
- Оптичні сенсори (PM2.5, PM10)
- NDIR (недисперсійні інфрачервоні) сенсори (C2, CH4)

- Фотоіонізаційні детектори (PID) (VC)
- Лазерні сенсори (PM, N2, 3)
- Напівпровідникові сенсори (C, CH4, H2)
- Мультиспектральні та інфрачервоні камери (для непрямого аналізу забруднення)
- Акустичні сенсори (для виявлення джерел шуму та непрямого моніторингу)

Таблиця 1.1. Порівняння сенсорів.

Тип сенсора	Тип забруднювача	Принцип дії	Точність	Вага	Енергоспоживання
Електрохімічний	C, Nx, S2, 3, H2S	Окисно-відновна реакція	±5% (C), до 10ppb	5–50 г	Дуже низьке (до 50 мА)
Оптичний (лазерний)	PM2.5, PM10	Розсіювання світла	±10% (PM2.5)	10–100 г	Низьке (до 100 мА)
NDIR	C2, CH4	Поглинання ІЧ-випромінювання	±(50ppm+5%)	5–30 г	Низьке (40–125 мА)
PID	VC	Фотоіонізація	1ppb–10ppm	20–100 г	Середнє (100–200 мА)
Напівпровідниковий	C, CH4, H2, дим	Зміна електропровідності	Висока	5–20 г	Дуже низьке (до 20 мА)
Мультиспектральна камера	Непрямі показники (NDVI, N2, 3)	Аналіз спектру відбиття	Залежить від задачі	50–500 г	Високе (до 1 А)
Акустичний	Шум, непрямі джерела	Аналіз звукових хвиль	Висока	100–500 г	Середнє

Кожен тип сенсора має свої особливості, переваги та обмеження, що визначаються принципом дії, чутливістю, точністю, вагою та енергоспоживанням.

Електрохімічні сенсори є найбільш поширеними для виявлення газових забруднювачів (C, Nx, S2, 3, H2S). Вони мають високу чутливість, низьке енергоспоживання та компактні розміри, що ідеально підходить

для інтеграції на БПЛА. Наприклад, модулі Winsen ZE12A, Honeywell AQ3, Alphasense N2, Sensirin SCD30 демонструють точність до 10ppb для N₂ та ±5% для C [3,4].

Оптичні (лазерні) сенсори використовуються для вимірювання концентрації твердих частинок (PM_{2.5}, PM₁₀). Вони працюють на принципі розсіювання світла, мають високу точність (±10% для PM_{2.5}), швидкий час відгуку (≤ 10 с) і низьке енергоспоживання. Прикладом є сенсори Plantwer, Netvx RA0716, Sensirin SPS30610.

NDIR-сенсори (недисперсійні інфрачервоні) застосовуються для моніторингу C₂ та CH₄. Вони мають високу вибірковість, довгий термін служби (>10 років), низьке енергоспоживання та компактні розміри (5–30 г). Наприклад, модуль Winsen MH-Z19E має точність $\pm(50\text{ppm}+5\%)$ та енергоспоживання <40 мА [5,10].

Фотоіонізаційні детектори (PID) призначені для виявлення летких органічних сполук (VC). Вони забезпечують широкий діапазон виявлення (1ppb–10000ppm), швидкий час відгуку та високу роздільну здатність, але мають більшу вагу та енергоспоживання порівняно з електрохімічними сенсорами [10].

Напівпровідникові сенсори (MQ-2, MQ-7) використовуються для виявлення C, CH₄, H₂, диму. Вони мають низьку вартість, просту інтеграцію, але чутливі до температури та вологості, що вимагає періодичного калібрування.

Мультиспектральні та інфрачервоні камери дозволяють здійснювати непрямий моніторинг забруднення (наприклад, визначення індексу NDVI для оцінки стану рослинності, виявлення N₂, 3). Вони мають високу вагу та енергоспоживання, але забезпечують багатофакторний аналіз.

Акустичні сенсори застосовуються для виявлення джерел шуму, непрямого моніторингу та ідентифікації дронів. Вони мають високу

точність, але більшу вагу та енергоспоживання, що обмежує їх використання на малих БПЛА [11,12].

Принципи дії сенсорів

Електрохімічні сенсори

Електрохімічні сенсори працюють на основі окисно-відновних реакцій між цільовим газом і реагентом на електроді. В результаті реакції генерується електричний струм, пропорційний концентрації газу. Основні переваги: висока точність, вибірковість, низьке енергоспоживання, компактність, довготривала стабільність. Недоліки: обмежений термін служби (2–5 років), чутливість до температури та вологості, перехресна чутливість до інших газів.

Оптичні сенсори (лазерні, фотометричні)

Оптичні сенсори для PM2.5/PM10 використовують принцип розсіювання світла: лазерний або світлодіодний промінь проходить через потік повітря, і по зміні інтенсивності розсіяного світла визначається концентрація частинок. Вони забезпечують швидкий час відгуку, високу точність, але можуть бути чутливими до вологості та забруднення оптики [26,10].

NDIR-сенсори

Недисперсійні інфрачервоні сенсори (NDIR) вимірюють концентрацію газу (CO₂, CH₄) за поглинанням інфрачервоного випромінювання на певній довжині хвилі. Кожен газ має свою спектральну характеристику, що дозволяє точно визначати його концентрацію. Переваги: висока вибірковість, довгий термін служби, низьке енергоспоживання. Недоліки: більша вартість, чутливість до забруднення оптики, потреба у періодичному калібруванні [5, 14, 15].

Фотоіонізаційні детектори (PID)

PID-сенсори використовують ультрафіолетове випромінювання для іонізації летких органічних сполук (VOC). Іонізовані молекули генерують

електричний струм, пропорційний концентрації газу. Переваги: широкий спектр виявлення, висока чутливість. Недоліки: чутливість до забруднення, потреба у періодичному обслуговуванні.

Напівпровідникові сенсори

Напівпровідникові сенсори (наприклад, MQ-2) працюють на основі зміни електропровідності оксиду олова при взаємодії з газами. Вони мають низьку вартість, просту інтеграцію, але чутливі до температури, вологості та мають нижчу вибірковість порівняно з електрохімічними сенсорами [1].

Мультиспектральні та інфрачервоні камери

Мультиспектральні камери реєструють інтенсивність випромінювання у декількох діапазонах спектра, що дозволяє аналізувати стан рослинності, виявляти непрямі ознаки забруднення (наприклад, N₂, O₃). Інфрачервоні камери використовуються для виявлення температурних аномалій, джерел теплового забруднення, пожеж тощо.

Акустичні сенсори

Акустичні сенсори аналізують звукові хвилі для виявлення джерел шуму, ідентифікації дронів, а також можуть використовуватися для непрямого моніторингу забруднення (наприклад, виявлення промислових джерел) [11,12].

Точність сенсорів та фактори, що впливають на вимірювання

Точність сенсорів визначається типом сенсора, якістю калібрування, умовами експлуатації (температура, вологість, вібрації), перехресною чутливістю, деградацією елементів та якістю обробки даних [10, 16].

Електрохімічні сенсори: точність $\pm 5\%$ для CO, до 10ppb для N₂, O₃. Вплив температури компенсується вбудованими датчиками, але екстремальні умови можуть знижувати точність. Перехресна чутливість до інших газів (наприклад, водень, етанол) може спотворювати результати.

Оптичні сенсори: точність $\pm 10\%$ для PM2.5, $\pm 10 \text{мкг/м}^3$ для PM10. Вплив вологості та забруднення оптики може призводити до похибок, тому потрібна регулярна чистка та калібрування [6,10].

- NDIR-сенсори: точність $\pm(50 \text{ppm} + 5\%)$ для CO₂, $\pm 0.35 \text{ppm}$ для CO₂ (ABB LGR-ICS). Вплив температури та вологості компенсується алгоритмами, але забруднення оптики може знижувати точність [15].

- PID-сенсори: точність до 1ppb, але чутливі до забруднення та вологості.

- Напівпровідникові сенсори: точність висока для CO, CH₄, але чутливість до температури та вологості вимагає періодичного калібрування.

Фактори деградації: температурні коливання, волога, механічні удари, електромагнітні завади, старіння елементів. Методи мінімізації: стабілізація температури, герметизація корпусу, віброізоляція, екранування, регулярне калібрування, використання алгоритмів самокалібрування та хмарних сервісів для дистанційної корекції даних [10,16].

Вага та енергоспоживання сенсорів для інтеграції на БПЛА

Вага та енергоспоживання сенсорів є критичними параметрами для інтеграції на БПЛА, особливо малих та середніх моделей.

- Електрохімічні сенсори: вага 5–50 г, енергоспоживання до 50 мА (живлення 3–5 В), що дозволяє використовувати їх на малих дронах.

- Оптичні сенсори: вага 10–100 г, енергоспоживання до 100 мА.

- NDIR-сенсори: вага 5–30 г, енергоспоживання <40 мА (середній струм), піковий до 125 мА.

- PID-сенсори: вага 20–100 г, енергоспоживання 100–200 мА.

- Мультиспектральні камери: вага 50–500 г, енергоспоживання до 1 А.

- Акустичні сенсори: вага 100–500 г, енергоспоживання середнє.

Вибір сенсора залежить від типу БПЛА, тривалості польоту, необхідної точності та завдань моніторингу. Для довготривалих місій перевага надається сенсорам з низьким енергоспоживанням та малою вагою.

Таблиця 2.1. - Порівняння комерційних сенсорних модулів

Модуль	Тип забруднювача	Принцип дії	Точність	Вага	Енергоспоживання	Особливості
Winsen ZE12A	C, S2, N2, 3	Електрохімічний	≤10ppb	39×44 мм	<50 мА	Темп. компенсація, цифровий/аналоговий вихід
Alphasense N2	N2	Електрохімічний	50ppb	20–32 мм	<50 мА	Leak-free, довгий термін служби
Sensirion SCD30	C2, вологість	NDIR, ємнісний	±0.3°C, ±2% RH	35×23 ×7 мм	<40 мА	Автоматична компенсація, регулярне калібрування
Plantwer PMS7003	PM2.5, PM10	Лазерний	±10%	50 г	<100 мА	Швидкий час відгуку, компактність

Winsen пропонує універсальні електрохімічні модулі для C, S2, N2, 3 з високою вибірковістю, температурною компенсацією, цифровим та аналоговим виходом, простотою інтеграції. Модулі мають компактні розміри, низьке енергоспоживання, термін служби до 2 років, точність до 10ppb, що дозволяє використовувати їх на малих БПЛА для міського та промислового моніторингу [4].

Alphasense спеціалізується на електрохімічних сенсорах N2, C, S2 з точністю до 50ppb, leak-free корпусом, довгим терміном служби, високою вибірковістю. Сенсори підходять для портативних та стаціонарних систем, мають низьке енергоспоживання, просту інтеграцію, гарантію надійності 8.

Sensirion пропонує NDIR-сенсори C2 (SCD30), ємнісні сенсори вологості, лазерні сенсори PM2.5 (SPS30) з високою точністю, автоматичною компенсацією, регулярним калібруванням, компактними

розмірами, низьким енергоспоживанням. Сенсори ідеальні для розумних будинків, HVAC, міського моніторингу[10].

Plantwer виробляє лазерні сенсори PM2.5/PM10 (PMS7003, PMS5003) з точністю $\pm 10\%$, швидким часом відгуку, компактністю, низьким енергоспоживанням, що дозволяє використовувати їх на малих БПЛА для оперативного моніторингу якості повітря

1.2. Обробка даних сенсорів.

Операційні аспекти: планування маршрутів, час польоту, логістика

Планування маршрутів

Оптимізація маршрутів БПЛА здійснюється з урахуванням розташування джерел забруднення, метеоумов, обмежень по висоті та зоні польоту, енергоспоживання, ваги корисного навантаження. Використовуються генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок, мурашині алгоритми, градієнтний спуск, A* для пошуку найкоротших шляхів, мінімізації дублювання, підвищення ефективності збору даних.

Час польоту та логістика

Тривалість польоту залежить від ємності акумуляторів, ваги сенсорів, погодних умов, типу БПЛА. Для масштабних місій використовуються рої дронів, гібридні паливні системи, водневі двигуни. Логістика включає підготовку обладнання, зарядку акумуляторів, планування маршрутів, отримання дозволів, організацію передачі даних, обробку та валідацію результатів

Калібрування сенсорів на БПЛА та методи корекції даних

Калібрування сенсорів є ключовим для забезпечення точності вимірювань. Традиційно воно здійснюється у лабораторних умовах із використанням еталонних газових сумішей, температурних та вологісних камер. Проте для сенсорів, встановлених на БПЛА, регулярне лабораторне

калібрування є складним через мобільність та важкодоступність місць експлуатації.

Самокалібрування та хмарні сервіси

Сучасні підходи передбачають використання алгоритмів самокалібрування та самонавчання, які дозволяють сенсорам автоматично оцінювати і коригувати власні похибки на основі статистичного аналізу вхідних даних, використання внутрішніх або зовнішніх еталонів, порівняння з іншими сенсорами, а також за допомогою моделей цифрової компенсації. Хмарні сервіси дозволяють дистанційно коригувати покази сенсорів, порівнювати їх з еталонними величинами, обчислювати поправки та передавати їх на пристрій у режимі реального часу[10].

Методи корекції даних

- Температурна компенсація: Вбудовані датчики температури дозволяють коригувати покази сенсорів залежно від температури навколишнього середовища.
- Алгоритми фільтрації: Використання фільтрів Калмана, рекурентних нейронних мереж (LSTM, NAS-RNN) для компенсації шуму, вібрацій, нестабільності навігаційних систем.
- Статистична оцінка стабільності похибки: Аналіз історії вимірювань для виявлення дрейфу, деградації характеристик.
- Верифікація результатів калібрування: Формування цифрового калібрувального сертифіката, захищена передача оновлених параметрів на пристрій.

Валідація даних

Валідація даних моніторингу здійснюється шляхом порівняння з еталонними станціями, використанням контрольних вимірювань, статистичних методів оцінки невизначеності (IS/IEC Guide 98-3:2009, ДСТУ IS 5725-1:2005), а також міжнародних стандартів (NF EN 17628, 2022).

Стабільність польоту БПЛА є критичною для забезпечення точності вимірювань, особливо для оптичних, лазерних та мультиспектральних сенсорів. Основні фактори, що впливають на стабільність:

- Вібрації та турбулентність: Використання стабілізаційних систем, гіростабілізованих підвісів, демпфуючих контейнерів для зниження впливу вібрацій та температурних коливань.
- Пориви вітру: Впливають на траєкторію польоту, якість збору даних, особливо при відсутності GPS. Навчання операторів тримати дрон на місці, використання режиму АТТІ для тренувань.
- Вага корисного навантаження: Впливає на маневреність, стабільність, тривалість польоту. Жорстке кріплення сенсорів та підвісів знижує ризик розкачування дрона.
- Системи навігації та позиціонування: Використання GNSS-модулів, інерціальних вимірювальних блоків (ІВБ), LiDAR для точного визначення координат, компенсації руху та стабілізації польоту.

Обробка даних та алгоритми (фільтрація, геоприв'язка, картографування)

Фільтрація та попередня обробка

- Фільтри Калмана: Використовуються для компенсації шуму, стабілізації траєкторії, корекції навігаційних параметрів після втрати GPS-сигналу.
- Рекурентні нейронні мережі (LSTM, NAS-RNN): Застосовуються для адаптивної фільтрації даних гіроскопа, компенсації динамічних варіацій шумових характеристик ІВБ.
- Генетичні алгоритми, оптимізація рою частинок, мурашині алгоритми: Використовуються для оптимізації маршрутів, планування траєкторій групи БПЛА, мінімізації дублювання маршрутів, підвищення ефективності збору даних.

Геоприв'язка та картографування

- Геоприв'язка даних: Всі вимірювання сенсорів прив'язуються до координат GPS, що дозволяє будувати карти розподілу забруднювачів, вертикальні профілі, визначати джерела викидів.
- Картографування: Використання GIS-систем, хмарних платформ для візуалізації даних, побудови тривимірних моделей місцевості, інтеграції даних з різних джерел (дрони, супутники, наземні станції).
- Інтеграція з ШІ: Алгоритми машинного навчання використовуються для автоматичної класифікації джерел забруднення, прогнозування тенденцій, моделювання динаміки екосистем, виявлення аномалій та оптимізації маршрутів.

1.3. Переваги та обмеження використання БПЛА для моніторингу

Основні переваги

1. Мобільність і доступ до важкодоступних районів: БПЛА можуть швидко переміщатися між різними ділянками, охоплювати великі території, включаючи гірські, лісові, водні та промислові зони, де наземні станції не можуть бути розміщені.
2. Оперативність збору даних: Можливість збору даних у реальному часі, швидка реакція на екологічні загрози, аварійні ситуації, викиди забруднювачів.
3. Гнучкість у налаштуваннях сенсорів: БПЛА можуть бути оснащені різними типами сенсорів залежно від завдань моніторингу, що дозволяє адаптувати систему до конкретних потреб.
4. Висока просторово-часова роздільна здатність: Можливість отримання даних з різних висот, побудова вертикальних профілів забруднення, деталізоване картографування розподілу забруднювачів[15].

5. Зниження ризиків для персоналу: Виконання завдань у небезпечних зонах без фізичної присутності людини, мінімізація ризиків для здоров'я та життя операторів.

6. Економічна ефективність: Зниження витрат на обладнання, обслуговування та логістику порівняно з традиційними методами, особливо для короткострокових або локальних досліджень [11].

Обмеження та недоліки БПЛА у моніторингу повітря

1. Обмежений час польоту: Тривалість польоту залежить від ємності акумуляторів, ваги корисного навантаження, погодних умов. Для тривалих місій потрібні рої дронів або гібридні паливні системи [17].

2. Вплив погодних умов: Вітер, дощ, туман, екстремальні температури можуть ускладнювати або унеможлиблювати політ, знижувати якість вимірювань.

3. Обмеження по висоті та зоні польоту: Законодавчі обмеження щодо висоти (до 120 м), заборонені зони (аеропорти, військові об'єкти, прифронтові території), необхідність отримання дозволів.

4. Вага та енергоспоживання сенсорів: Встановлення важких або енергоємних сенсорів обмежує тривалість польоту та маневреність БПЛА [10].

5. Стабільність польоту: Вібрації, турбулентність, пориви вітру можуть впливати на якість вимірювань, особливо для оптичних та лазерних сенсорів. Необхідність використання стабілізаційних систем, гіростабілізованих підвісів [21].

6. Калібрування сенсорів: Потреба у регулярному калібруванні, складність дистанційної корекції, вплив деградації елементів, перехресна чутливість до інших газів.

7. Обмеження по масі корисного навантаження: Малі дрони не можуть нести важкі сенсори або багатосенсорні платформи.

8. Вартість обладнання та обслуговування: Хоча БПЛА дешевші за стаціонарні станції, високоточні сенсори, стабілізаційні системи, акумулятори та обслуговування можуть бути дорогими для масштабних проєктів [1].

9. Етичні та правові аспекти: Питання конфіденційності, безпеки, відповідальності за порушення правил польотів, необхідність реєстрації та сертифікації обладнання [18,19]

Технічні виклики: шум, перехресна чутливість, час відгуку сенсорів

Шум та вібрації

Вібрації, турбулентність, пориви вітру, рух дрона можуть створювати шум у даних сенсорів, особливо для оптичних, лазерних та акустичних сенсорів. Для компенсації використовуються стабілізаційні системи, гіростабілізовані підвіси, демпфуючі контейнери, алгоритми фільтрації (Калмана, LSTM, NAS-RNN).

Перехресна чутливість

Сенсори можуть реагувати не лише на цільовий газ, але й на інші компоненти атмосфери (водень, етанол, водяна пара), що призводить до спотворення результатів. Для мінімізації перехресної чутливості використовуються селективні електроди, температурна компенсація, алгоритми корекції, регулярне калібрування, аналіз спектральних характеристик.

Час відгуку

Час відгуку сенсорів визначає оперативність збору даних. Для електрохімічних сенсорів він складає 20–120 с, для лазерних та оптичних – до 10 с, для PID – менше 1 с. Швидкий час відгуку дозволяє оперативно реагувати на зміни концентрації забруднювачів, особливо при моніторингу аварійних ситуацій, витоків, локальних джерел

Перспективи розвитку: мініатюризація, багатосенсорні платформи, ШІ для калібрування

Мініатюризація сенсорів

Сучасні тенденції спрямовані на зменшення розмірів, ваги та енергоспоживання сенсорів, що дозволяє інтегрувати їх на малі БПЛА, збільшувати тривалість польоту, розширювати функціональність. Виробники (Bosch Sensortec, Sensirion, mms, Honeywell) розробляють компактні MEMS-сенсори, багатofункціональні модулі з цифровими інтерфейсами (I2C, SPI, UART) [10, 24].

Багатосенсорні платформи

Інтеграція декількох сенсорів (C, N_x, S₂, 3, PM_{2.5}, CO₂, VC, температура, вологість, GPS, LiDAR, камери) на одній платформі дозволяє здійснювати комплексний моніторинг, підвищувати точність, забезпечувати багатofакторний аналіз, автоматичне картографування, оптимізацію маршрутів, виявлення джерел забруднення [12].

Використання ШІ для калібрування та обробки даних

Алгоритми машинного навчання, нейронні мережі, генетичні алгоритми використовуються для автоматичної калібрування сенсорів, компенсації похибок, прогнозування несправностей, оптимізації маршрутів, класифікації джерел забруднення, моделювання динаміки екосистем, виявлення аномалій, інтеграції даних з різних джерел (дрони, супутники, наземні станції) [26].

Рої дронів та автономні системи

Використання роїв дронів дозволяє охоплювати великі території, підвищувати ефективність збору даних, забезпечувати автономність, оптимізувати маршрути, мінімізувати дублювання, підвищувати точність та швидкість моніторингу. Алгоритми взаємодії між дронами, комунікація, розподіл завдань, автономне прийняття рішень є пріоритетними напрямками розвитку технології.

Нормативи, стандарти та методики валідації даних моніторингу повітря

Європейські та міжнародні стандарти

- Директива 2008/50/ЄС: встановлює граничні значення для PM2.5, PM10, S2, N2, C, 3, методики вимірювання, вимоги до точності, регулярності, валідації даних.
- IS/IEC Guide 98-3:2009, ДСТУ IS 5725-1:2005: стандарти оцінки невизначеності вимірювань, методики калібрування, валідації, статистичного аналізу похибок.
- NF EN 17628, 2022: стандарти для DIAL (differential absorption lidar) та інших методів топ-даун моніторингу викидів на промислових об'єктах.
- CAQI (Common Air Quality Index): індекс якості повітря, що базується на вимірюваннях PM2.5, PM10, N2, 3, S2, C, використовується для порівняння якості повітря у містах Європи²³.

Українські нормативи

- Повітряний кодекс України, Правила використання повітряного простору: регламентують використання БПЛА, вимоги до реєстрації, сертифікації, дозволів, обмежень по висоті та зоні польоту.
- Державні стандарти України: встановлюють вимоги до точності, регулярності, методики калібрування сенсорів, валідації даних, звітності.

Етичні та правові аспекти використання БПЛА для моніторингу

Конфіденційність та захист персональних даних

Використання БПЛА для моніторингу може порушувати права на приватність, особливо при відеозйомці, зборі даних у приватних володіннях, зйомці людей без їхньої згоди. Закон України «Про захист персональних даних» регламентує використання БПЛА для

спостереження, встановлює відповідальність за порушення конфіденційності.

Відповідальність за порушення правил польотів

Порушення правил польотів (політ у заборонених зонах, без дозволу, на недозволеній висоті, керування в нетверезому стані) тягне за собою адміністративну та кримінальну відповідальність, штрафи, конфіскацію обладнання, позбавлення права на використання БПЛА. Для комерційного використання потрібна сертифікація оператора, страхування, дотримання вимог безпеки.

Законодавчі обмеження

В Україні діють обмеження по висоті (до 120 м), заборонені зони (аеропорти, військові об'єкти, прифронтові території), необхідність реєстрації дронів вагою понад 250 г, отримання дозволів від місцевих адміністрацій, СБУ, Державіаслужби. Воєнний стан додає додаткові обмеження, особливо у прифронтових регіонах[18,20]

Економічна ефективність: вартість обладнання, обслуговування, порівняння з традиційними методами

Вартість обладнання

- Сенсори: електрохімічні – \$50–\$200, лазерні – \$100–\$300, NDIR – \$100–\$250, мультиспектральні камери – \$500–\$5000, акустичні сенсори – \$400–\$500.

- БПЛА: малі дрони – \$500–\$2000, професійні – \$2000–\$10000, рої дронів – \$10000–\$50000.

- Стабілізаційні системи, підвіси, акумулятори: \$100–\$1000.

Вартість обслуговування

- Калібрування сенсорів: \$50–\$200 на рік.

- Заміна акумуляторів: \$50–\$200.

- Обслуговування БПЛА: \$100–\$500 на рік.

- Страхування, сертифікація, отримання дозволів: \$100–\$500.

Порівняння з традиційними методами

- Наземні станції: вартість \$5000–\$50000, обмежене просторове охоплення, висока точність, тривала експлуатація.
- БПЛА: нижча вартість для короткострокових або локальних досліджень, висока мобільність, гнучкість, можливість оперативного реагування, зниження витрат на обслуговування, особливо для важкодоступних районів [11].

Економічна ефективність

Використання БПЛА дозволяє знизити витрати на моніторинг, підвищити ефективність збору даних, забезпечити оперативність реагування, зменшити ризики для персоналу, охопити великі території, інтегрувати дані з різних джерел, автоматизувати процеси збору, обробки та аналізу інформації. Особливо ефективно для аварійних ситуацій, локальних досліджень, моніторингу промислових та міських районів, важкодоступних територій [11].

Використання БПЛА для моніторингу забруднення атмосферного повітря є одним із найбільш перспективних напрямків сучасної екологічної практики. Основні переваги – мобільність, гнучкість, оперативність, висока просторово-часова роздільна здатність, економічна ефективність, можливість інтеграції багатосенсорних платформ, використання ШІ для обробки та калібрування даних, автоматизація процесів збору та аналізу інформації.

Технічні виклики – стабільність польоту, калібрування сенсорів, перехресна чутливість, час відгуку, вплив погодних умов, обмеження по висоті та зоні польоту, етичні та правові аспекти – поступово вирішуються завдяки розвитку технологій, мініатюризації сенсорів, впровадженню алгоритмів самокалібрування, хмарних сервісів, автономних систем, роїв

дронів, багатосенсорних платформ, інтеграції з супутниковими та наземними системами.

Перспективи розвитку включають:

- Мініатюризацію сенсорів та зниження енергоспоживання.
- Інтеграцію багатосенсорних платформ для комплексного моніторингу.
- Використання ШІ для автоматичної калібрування, обробки, аналізу та прогнозування.
- Розвиток роїв дронів для масштабних місій, оптимізації маршрутів, підвищення ефективності збору даних.
- Гармонізацію нормативної бази, впровадження міжнародних стандартів, автоматизацію процесів отримання дозволів, сертифікації, реєстрації.
- Розширення сфер застосування – від міського та промислового моніторингу до аграрного сектору, екологічних досліджень, аварійних ситуацій, охорони здоров'я, безпеки, управління транспортом.

Впровадження БПЛА для моніторингу атмосферного повітря сприяє підвищенню якості екологічного управління, своєчасному реагуванню на загрози, збереженню біорізноманіття, сталому розвитку, інтеграції України у світову екологічну спільноту

РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ВІДОМИХ ПРИКЛАДІВ ЗАСТОСУВАННЯ.

2.1. Приклади застосування у міських та промислових районах

Міський моніторинг CO_2 , NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ вже є у різних країнах.

У Chengdu (Китай) проведено масштабне дослідження з використанням БПЛА DJI M600 Pro, оснащеного аналізатором ABB LGR-ICS GLA133 (A-ICS), для вертикального профілювання CO_2 . БПЛА здійснювали польоти на висоті до 300 м, збираючи дані з різних точок міста. В результаті було отримано високоточні профілі концентрації CO_2 , що дозволило оцінити міські викиди, визначити зони підвищеного забруднення, а також порівняти результати з інвентаризаційними даними. Основні переваги: гнучкість, швидкість розгортання, можливість охоплення великих територій, висока роздільна здатність [15].

Моніторинг $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , O_3 у Києві та Дніпрі

В Україні громадські організації та комерційні проекти (EcInf, EcCitizens) використовують БПЛА з оптичними сенсорами Plantwer, Netvx RA0716, Sensirin SPS30 для моніторингу $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3 у міських районах. Дані передаються у хмарні сервіси, інтегруються з мобільними додатками, GIS-платформами, що дозволяє оперативно інформувати населення про стан повітря, виявляти аномалії, реагувати на екологічні загрози [23].

Моніторинг VOC , CO , SO_2 у промислових зонах

У Франції на платформі TotalEnergies Anomaly Detection Initiatives (TADI) проведено контрольовані експерименти з використанням БПЛА, оснащених сенсорами AUSEA (pen-path laser absorption spectrometer), газовими лідарами, мультиспектральними камерами, інфрачервоними детекторами. В результаті було досягнуто точності виявлення витоків CH_4 до 0.01 г/с, а похибка оцінки потоку CH_4 склала від -20% до +20% для 24% вимірювань, що перевищує точність традиційних методів.

Приклади застосування в промислових районах та біля джерел викидів

Виявлення витоків CH₄, C₂, VC на нафтогазових об'єктах

БПЛА з лазерними, NDIR та електрохімічними сенсорами використовуються для виявлення витоків метану, C₂, VC на нафтогазових платформах, заводах, трубопроводах. Переваги: можливість обльоту важкодоступних ділянок, швидке локалізування джерел, зниження витрат на обслуговування, підвищення безпеки персоналу. Наприклад, система AUSEA (вага 1.4 кг, точність 10ppb для CH₄, 1ppm для C₂) дозволяє здійснювати вимірювання на відстані до 10 км, з високою частотою (24 Гц) та чутливістю до 1000ppm C₂[14].

Моніторинг викидів S₂, N_x, PM₁₀ на металургійних та хімічних підприємствах

БПЛА з електрохімічними сенсорами Winsen ZE12A, Honeywell AQ3, Alphasense N2, Sensirin SCD30 використовуються для моніторингу S₂, N_x, PM₁₀ на території заводів, кар'єрів, біля джерел неорганізованих викидів. Дані дозволяють оперативно реагувати на аварійні ситуації, оцінювати ефективність систем очищення, планувати екологічні заходи [9].

2.2. Приклади застосувань для відбору проб води.

Якість зразків води є одним із найважливіших факторів, що впливає на результати аналізу. Залежно від типу аналізу, час, протягом якого зразки води доставляються до лабораторії, має вирішальне значення. Ідеально, якщо б була створена інфраструктура, яка дозволила б доставляти всі зразки води до центральної або регіональної лабораторії протягом кількох годин після збору зразків (Bartram and Balance, 1996). Однак ця ситуація залежить від якості дорожньої системи та надійності моторизованих транспортних засобів для співробітників, що збирають

зразки. Проте ці зручності не завжди доступні у багатьох регіонах та країнах.

Існують різні методи відбору проб води. Методи, що використовуються для відбору проб поверхневих вод, часто залежать від характеристик потоку поверхневої води. Окрім цього, при виборі відповідного методу відбору проб води слід враховувати безпеку польового персоналу, придатність обладнання для аналізу, профілі польових вимірювань, просторову та тимчасову гетерогенність, екологічні характеристики, погодні умови, транспорт флювіальних мулів, а також джерела забруднень точкового та дифузного типу (Myers, 2006). Ці фактори необхідно враховувати для запобігання упереджень у вимірюванні властивостей води. Упередження, що виникають у процесі забору води, слід мінімізувати, обираючи відповідне місце відбору та техніку відбору проб. Кожна проба повинна відображати стан навколишнього середовища на момент її збору.

Надходження забруднювачів води з дифузних джерел відбувається лише після дощу або аварійних скидів протягом короткого часу. Це надходження можна відстежувати за допомогою водних пробовідбірників, керованих подіями (Neumann et al., 2003). Тому необхідна швидка техніка оцінки якості води для розуміння забруднень з дифузних джерел задля поліпшення моніторингу якості води.

БПЛА використовуються для різних завдань моніторингу навколишнього середовища, включаючи теплову інфрачервону зйомку геотермальних середовищ (Nishar et al., 2016), прибережне обстеження для топографічного картографування та вимірювань (Turner et al., 2016), а також моніторинг морської дикої природи (Frtuna et al., 2013) для виявлення та відстеження акул-молотів. БПЛА придатні для застосувань дистанційного зондування через їх здатність нести датчики та можливість спостерігати великі території за відносно коротким проміжком часу (Nilssen

et al., 2015). На ці платформи можуть впливати різні зовнішні та внутрішні фактори, включаючи зміну швидкості вітру, навколишні перешкоди, такі як дерева, та питання безпеки, пов'язані з труднощами експлуатації (Pattersn et al., 2014). Ці фактори можуть спричиняти проблеми під час відбору води; отже, вони можуть створювати труднощі. Проблеми отримання проб води за допомогою БПЛА необхідно вирішити до запуску місії з відбору проб над водним об'єктом. Важливо переконатися, що ключові водні хімічні показники не спотворюються за допомогою механізму, встановленого на БПЛА. Матеріали, що будуть використані для виготовлення обладнання для відбору проб води, повинні бути визначені з метою відбору проб води. Деякі матеріали схильні до реакцій з водою, тому обладнання для відбору води може викликати спотворення вимірювань у результаті органічного або неорганічного аналізу (Wilde et al., 2003). Щоб усунути та зменшити хімічні реакції, необхідно правильно підібрати матеріали для конкретного типу аналізу.

Безпілотний літальний апарат, який використовується для моніторингу якості води, повинен мати можливість переносити додаткову вагу механізму відбору проб, зібраної води та інших деталей, які дозволяють БПЛА плавати на поверхні води у випадку аварійного приземлення. Ці 5 навісних елементів називаються корисним навантаженням (Shan, 2016). БПЛА повинен створювати достатню тягу для підняття свого корисного навантаження (Varve і Patel, 2014). Тяга є одним із базових рухів мультикоптера, що створюється його пропелерами. Розвинена сила тяги безпосередньо пропорційна крутному моменту обертання моторів (Atlam і Klhe, 2013). Тому розмір моторів є важливим фактором для створення необхідної тяги для БПЛА. На ринку існують різні типи моторів, які використовуються для БПЛА. Кожен з цих моторів має різне споживання струму та розмір пропелера, необхідний для створення достатньої тяги для підйому апарата та його корисного

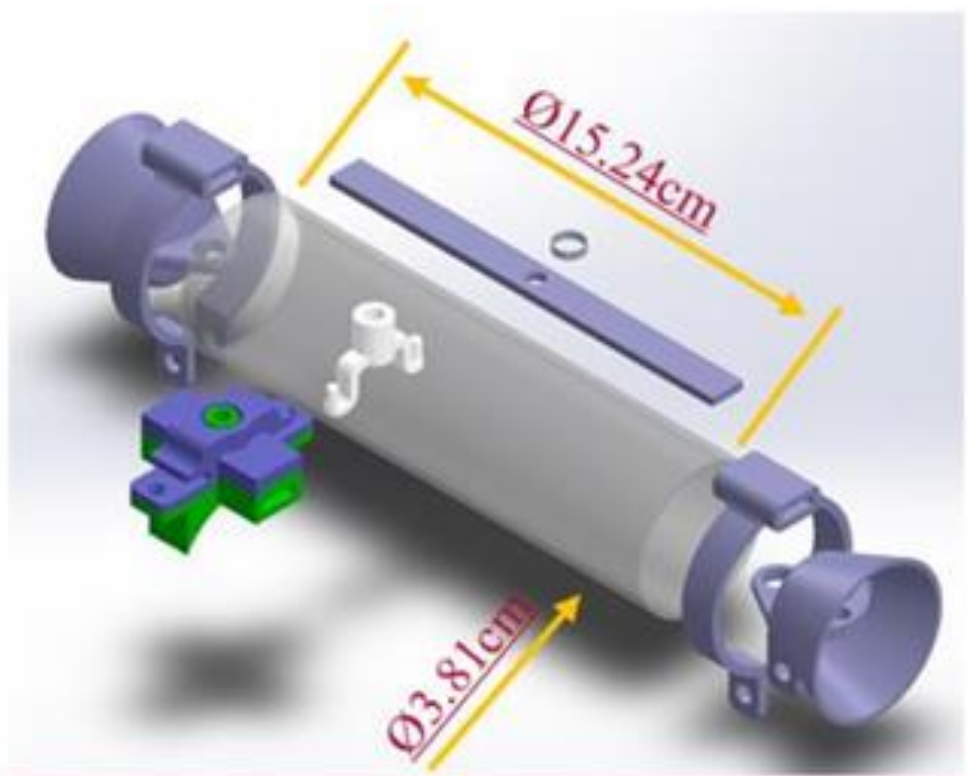
навантаження. Потрібно вибрати правильний розмір моторів, щоб забезпечити тягу для літального апарата та утримувати його у повітрі (зависання) під час відбору води.

Наразі використовуються різні методи моніторингу якості води. Один із цих методів – станції сенсорів мутності на основі супутників. Ці сенсори мутності на основі супутників у річкових потоках доступні для вимірювання кількості осаду у воді (SCWRRRI, 2004). Однак ці сенсори мають обмежену швидкість передачі даних, що перешкоджає політикам швидко приймати рішення для щоденного захисту якості води. Крім того, дані, надіслані сенсорами мутності на основі супутників, можуть бути неточними та ненадійними через взаємодію сигналів з атмосферою. Атмосферні ефекти, такі як затухання, спричинене хмарами, дощем та атмосферними газами можуть впливати на якість даних, що вимірюють сенсори (Кемпбелл та МакКендлес-молодший, 1996).

Іншим методом моніторингу якості води є використання автономних транспортних засобів для відбору проб води або вимірювань *in-situ* у водоймах. Одним із прикладів таких автономних транспортних засобів є автономний підводний апарат (AUV). AUV використовувалися для моніторингу якості води в останні роки. Ці апарати автономно контролюють якість води під час руху під водою. Однак моніторинг якості води за допомогою AUV може бути складним. Основною проблемою для такого типу підводних апаратів є те, що коли вони перебувають під водою, система GPS не може використовуватися для точного визначення позиції (Каріманзіра та ін., 2014). Через це AUV повинен бути обладнаний додатковими навігаційними системами або потребує акустичного позиціонування. Іншим прикладом автономних транспортних засобів, що використовуються для моніторингу якості води, є автономний надводний апарат (ASV). Безпілотний катер використовували в одному з останніх дослідницьких проєктів для автоматичного вимірювання показників якості

води. Апарат автоматично рухається до заздалегідь визначених точок забору проб та вимірює рН, розчинений кисень (D), електропровідність (EC), каламутність, температуру, глибину сенсора, глибину води, концентрацію хлорофілу-а та N3. Недоліками автоматичного відбору проб за допомогою катера були експлуатаційні труднощі через хитання з боку в бік та невизначені частоти керування двигуном (Каїзу та ін., 2011). На відміну від наведених вище методів, літак або БПЛА можна використовувати для збору аерознімків зацікавленої водойми. Аерознімки, виконані дистанційно за допомогою БПЛА, можуть допомогти візуалізувати порушення у воді та забезпечити покращені просторові дані моніторингу якості води.

У дослідженні Kpran, Cengiz, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Assisted Water Sampling" (2016). можемо побачити, як науковці університету Клемсона у США пристосували гексакоптер для відбору зразків води з природніх водойм. Для цього в систему додано мікроконтролер, сервопривід, та спеціально надрукований пробовідбірник із клапанами



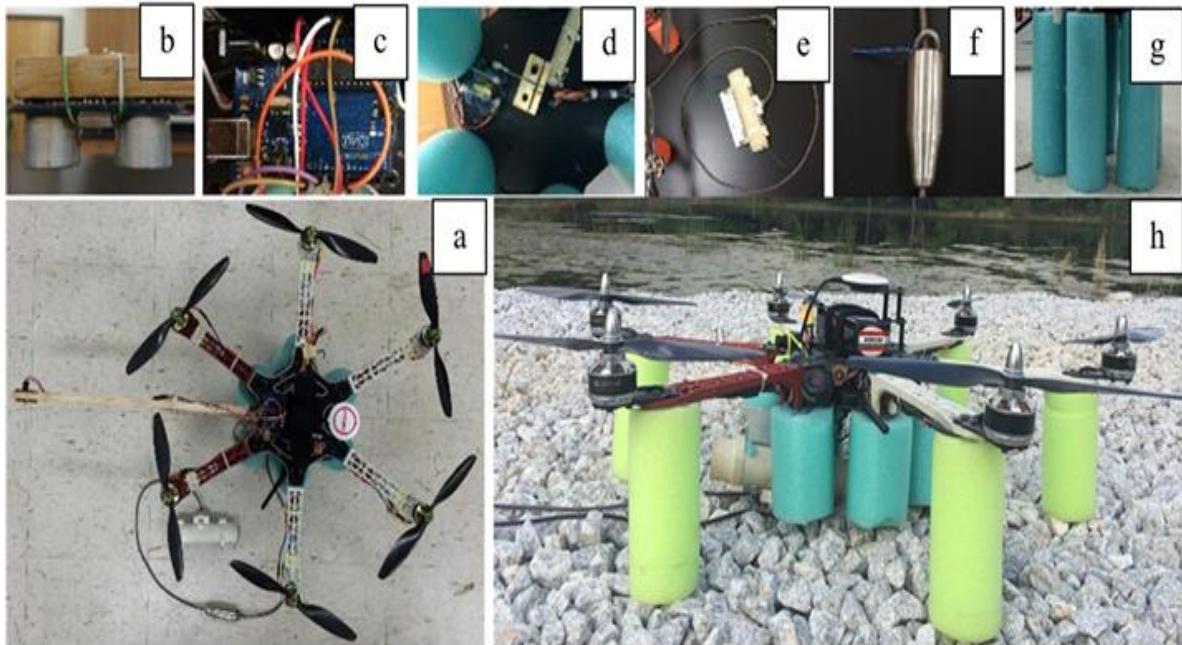


Рисунок 2.1. системи забору води Kraran,2016 (а) гексакоптер, б) ультразвуковий далекомір, с) мікроконтролер, d) сервомотор, е) пробовідбірник води, f) передавач, g) плаваючі кріплення, та h) гексакоптер зі всіма кріпленнями

2.3. Приклади відбору проб повітря

Також є чимало прикладів оцінки стану повітря за допомогою дронів Дослідження Villa TF, Salimi F, Mrtn K, Mrawska L, Gnzalez F. Development and Validatin f a UAV Based System fr Air Pllutin Measurements. Sensrs. (2016) присвячене розробці та валідації системи на базі безпілотного літального апарату (БПЛА) для вимірювання забруднення повітря від точкових джерел, таких як промислові труби або транспортні засоби. Основною проблемою, яку вирішували автори, був вплив повітряних потоків від пропелерів (ефекти «dwnwash» та «upwash») на точність забору проб повітря.

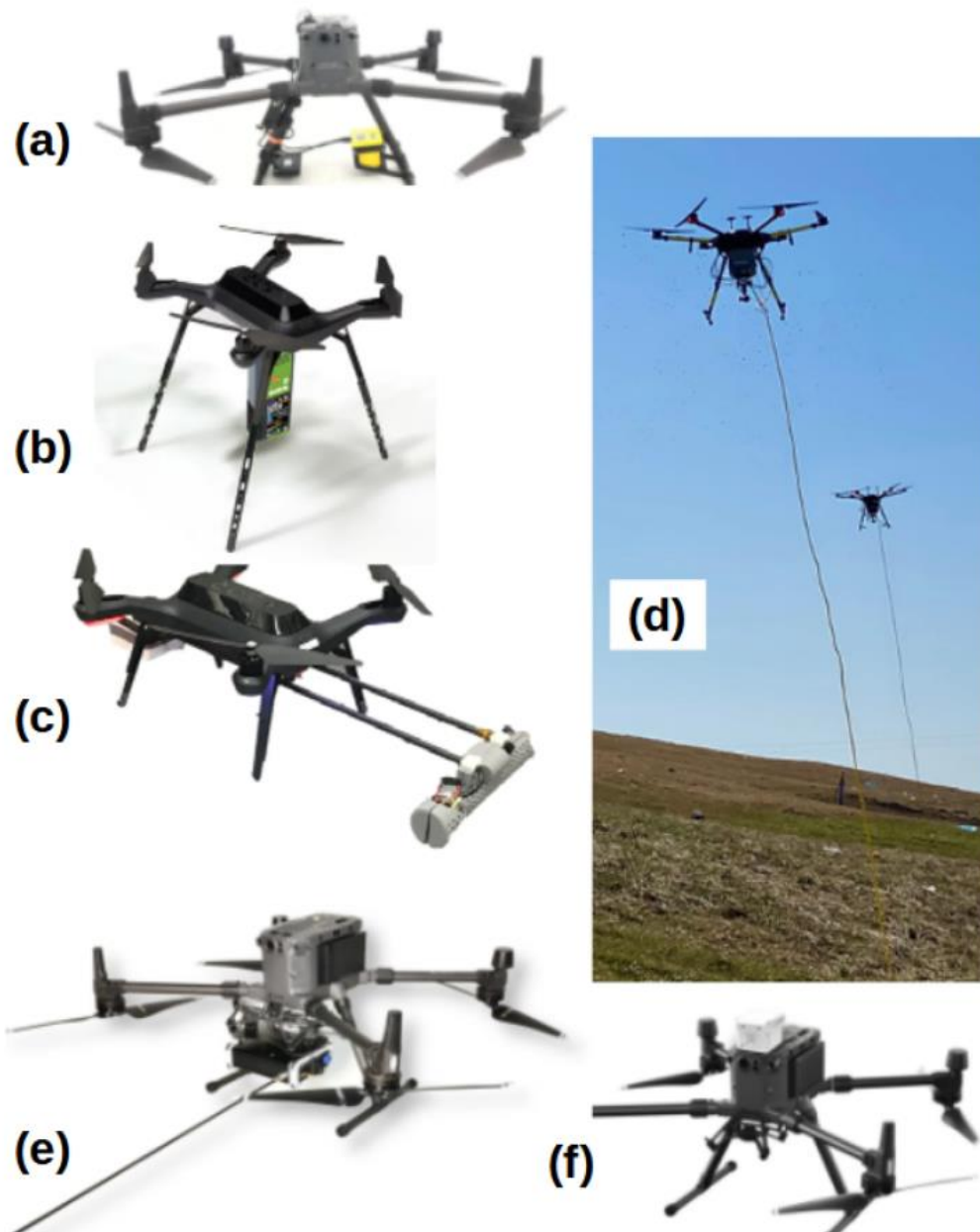


Рисунок 2.2. Варіанти кріплення повітрязабірників [27]

Як бачимо з цього малюнка, є різні варіанти кріплення сенсорів або повітрязабірників – знизу, зверху, збоку, із кріпленням трубок тощо.

За механізмом транспортування газу до сенсорів виділяють три основні рішення:

Активна система: передбачає використання додаткового пристрою, такого як вентилятор або помпа, для примусового нагнітання повітря до сенсора.

Напівактивна система: використовує повітряні потоки, що генеруються роторами самого дрона, для подачі повітря до вимірювальних приладів.

Пасивна система: не використовує жодних допоміжних пристроїв; забір повітря відбувається природним шляхом. У даному дослідженні було обрано саме пасивну систему, оскільки активні компоненти створюють додаткову вагу, що негативно впливає на тягу та баланс дрона.

За фізичним розташуванням на корпусі БПЛА описані такі варіанти:

1. На виносній штанзі (bm) збоку: Сенсори монтуються на вуглепластикових штангах, що виходять за межі корпусу. Це дозволяє розмістити їх у зоні, де вплив пропелерів мінімальний (на відстані 1000–1200 мм від центру), що є критичним для пасивного забору проб.

2. Над центром БПЛА: У деяких дослідженнях на базі квадрокоптерів це місце вважалось оптимальним, оскільки в центрі над апаратом фіксувалася мінімальна швидкість повітря.

3. Під корпусом БПЛА: Штанга може бути спрямована вниз, проте це вважається менш ефективним через сильний низхідний потік (dwnwash), який створює значну турбулентність.

4. Використання карданного з'єднання: Для кріплення штанг може використовуватися карданне з'єднання, яке дозволяє скласти систему під час зльоту та посадки, щоб не пошкодити її.

Особливості та компроміси: Вибір способу забору повітря залежить від типу місії. Для вимірювання викидів із точкових джерел (труб, кораблів) важливо, щоб забір відбувався безпосередньо всередині шлейфу забруднення. Хоча встановлення сенсорів ближче до центру БПЛА є безпечнішим при складних маневрах, воно значно збільшує похибку

вимірювання через розсіювання газів пропелерами. Цікаво, що потік повітря від гвинтів може навіть дещо покращити час відгуку пасивних сенсорів, оскільки він прискорює циркуляцію повітря навколо системи

Важливе питання не тільки виміряти забруднення, а й передати ці дані із геолокацією. Для цього найчастіше розробляють цілі системи з мікроконтролерами і антенами, які передають додатковий сигнал до наземної станції із приймачем

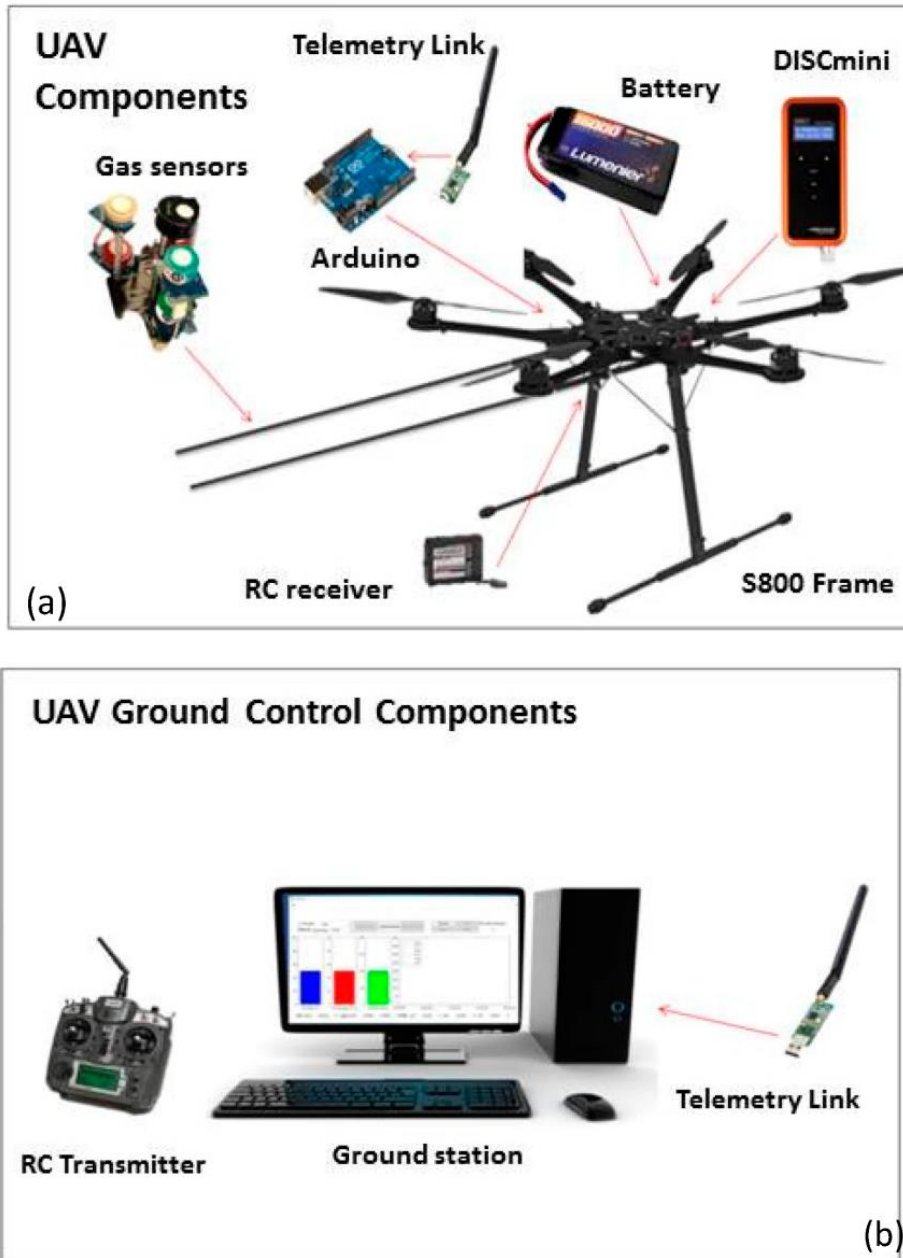


Рисунок 2.3. Схема прийому та обробки інформації [27]

Ключові аспекти дослідження:

Технічне оснащення: Для роботи використовували гексакоптер DJI S800 EV, обраний за його стабільність та здатність нести корисне навантаження понад 2 кг. Бортова система включала датчики для вимірювання CO₂, NO_x, NO₂, а також монітор DISCmini для визначення концентрації кількості частинок (PNC). Управління здійснювалося мікроконтролером Arduino MEGA 2560.

Експериментальна частина:

1. Тест 1 (Картування потоків): За допомогою професійного анемометра та системи 3D-відстеження VICN було створено карту швидкостей повітря навколо дрона. Це допомогло знайти зону, де вплив пропелерів мінімальний.

2. Тест 2 (Валідація): Вимірювали реальні викиди дизельного двигуна. Вчені порівнювали концентрації забруднювачів при увімкнених та вимкнених двигунах БПЛА, а також змінювали висоту та відстань датчиків від центру апарата.

Основні результати та висновки:

Оптимальне місце монтажу: Найкращою точкою для встановлення сенсорів визначено зону збоку від БПЛА на відстані 1000–1200 мм від його центру.

На цій відстані швидкість повітря від пропелерів падає до незначних показників (менше 1 м/с), що дозволяє датчикам працювати в пасивному режимі без значних спотворень.

Вплив пропелерів: Робота двигунів спричиняє ефект розсіювання (дисперсії) шлейфу забруднення, що призводить до зниження вимірних показників концентрації газів і частинок у реальному часі.

Точність замірів: Для отримання репрезентативних даних БПЛА має позиціонуватися так, щоб датчики знаходилися безпосередньо всередині шлейфу і максимально далеко від корпусу дрона. Дослідження

підтвердило, що концентрація забруднювачів була значно вищою, коли пропелери були вимкнені.

Моделювання: Було розроблено модель лінійної регресії, яка дозволяє оцінити, як саме положення датчика та відстань від центру БПЛА впливають на результати вимірювань. пропелери БПЛА створюють потужні повітряні потоки, відомі як ефекти *dwnwash* (низхідний потік) та *upwash* (висхідний потік), які є критичним фактором при вимірюванні якості повітря. Основний вплив пропелерів на концентрацію газів полягає в наступному:

Ефект розсіювання (дисперсії): Робота гвинтів спричиняє активне перемішування та розсіювання шлейфу забруднення ще до того, як повітря потрапить до датчиків

Це призводить до того, що виміряні концентрації газів (C , C_2 , N , N_2) та кількість частинок (PNC) значно знижуються у реальному часі, коли двигуни увімкнені

Залежність від відстані: Повітряні потоки від пропелерів найбільш інтенсивні безпосередньо біля гвинтів, що максимально спотворює дані

Дослідження показало, що швидкість повітря від роторів швидко падає і стає незначною (менше 1 м/с) лише на відстані понад 700 мм від центру БПЛА

Вплив на репрезентативність даних: Якщо датчики розташовані занадто близько до корпусу або під пропелерами, вони фіксують не справжню концентрацію у шлейфі, а суміш забрудненого повітря з чистим навколишнім повітрям, яке затягується гвинтами

Позитивний побічний ефект: Цікаво, що потік повітря від пропелерів може дещо пришвидшити час відгуку датчиків, оскільки він змушує повітря швидше циркулювати навколо системи, проте це не компенсує загальне заниження показників концентрації через розсіювання

Для отримання точних результатів джерела рекомендують встановлювати сенсори на відстані 1000–1200 мм збоку від БПЛА, де вплив пропелерів на газовий шлейф мінімальний, що дозволяє вимірювати концентрації, максимально наближені до реальних

Це дослідження встановлює важливі рекомендації для розробки БПЛА-систем моніторингу повітря, наголошуючи, що правильне розміщення повітрозабірника є критичним для точності даних

РОЗДІЛ 3. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ТА РАДІОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

3.1. Розробка кріплень для пристроїв під БПЛА DJ1 Phantm4

У нашій роботі ми виходили з наявних матеріалів. Квадрокоптер DJ1 Phantm4, який є у нас на факультеті ФАТЕ, має свої особливості.

Через специфічну аеродинамічну форму (рис.3.1) та численні датчики перешкод до нього складно просто прикріпити прилад стяжками. Якщо це зробити по центру знизу, майже кожен прилад буде закривати сенсори-далекоміри, і буде неправильна телеметрія та ускладнене керування. Якщо підвісити не по центру, втратиться стабілізація польоту. Зверху дрона це також практично неможливо через перешкоди для гвинтів.

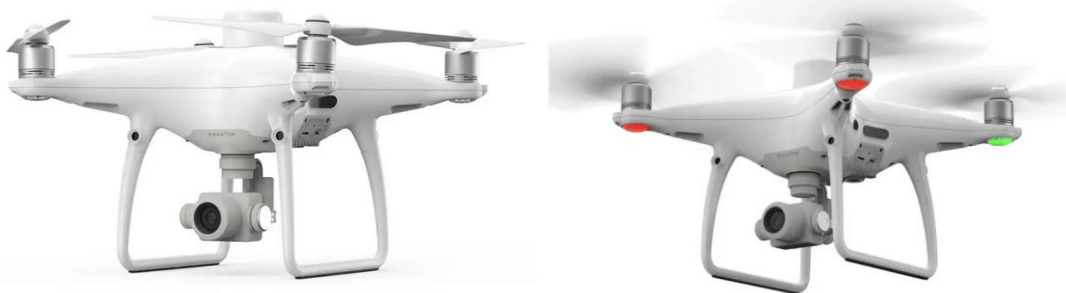


Рисунок 3.1. Форма БПЛА DJ1 Phantm4

Тому ми розробили спеціальне кріплення з фіксаторами та надрукували його на 3Д принтері.

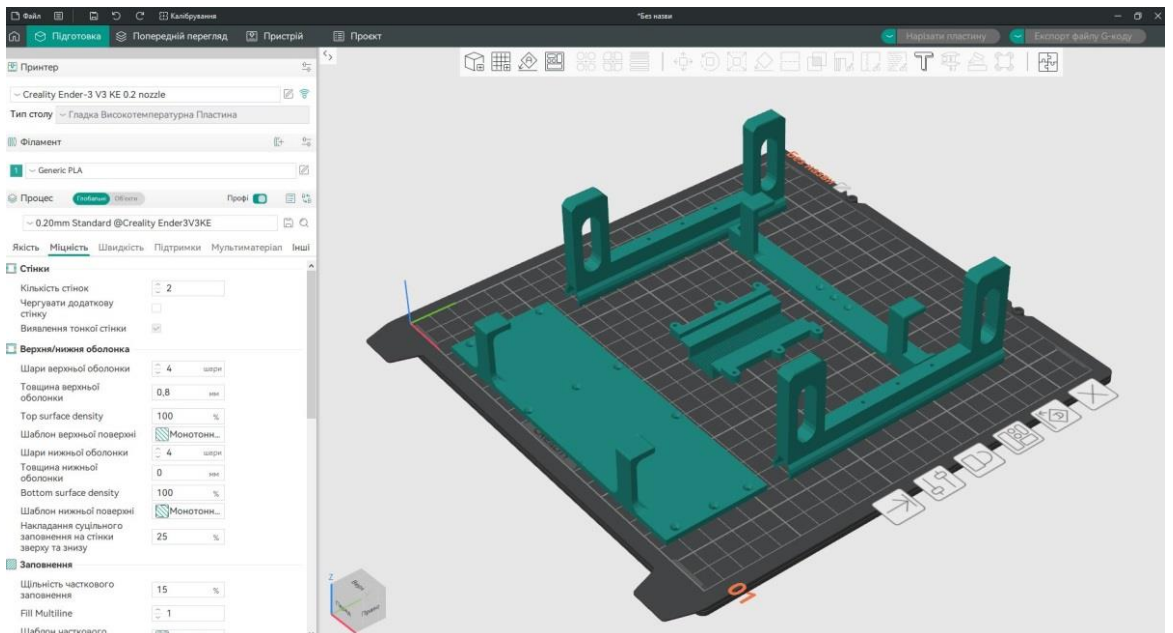
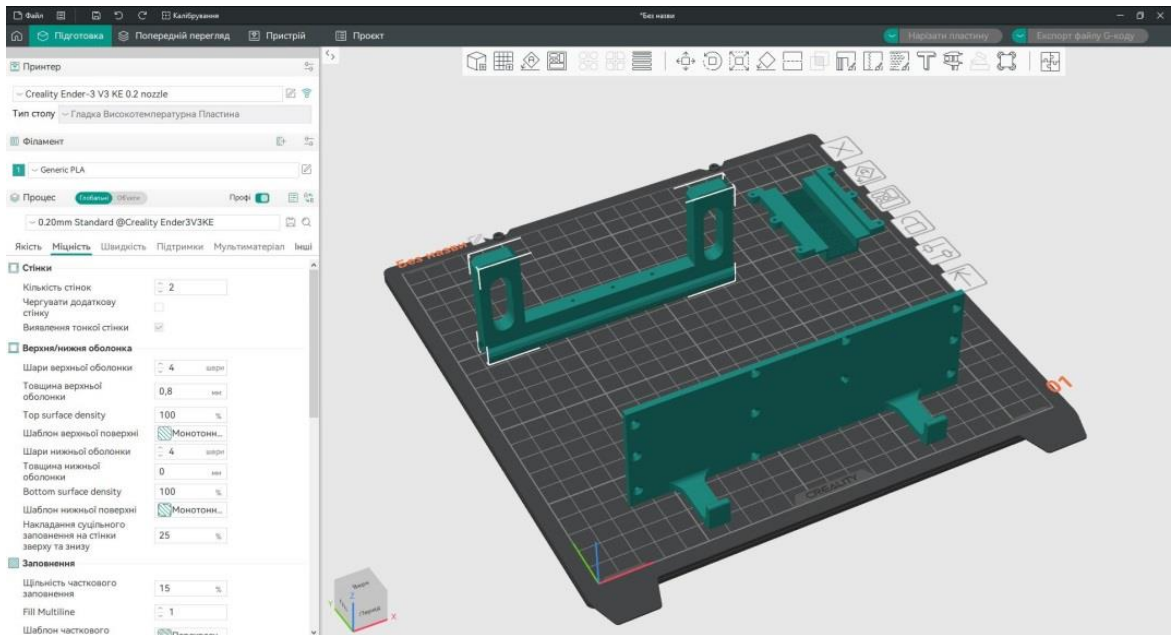


Рисунок 3.2. Скріншоти середовища розробки 3Д-моделі кріплення

Кріплення має фіксатори для ніжок квадрокоптера, основну частину для вставлення прилада та пристрій-заглушку для надійного фіксування



Рисунок 3.3. Дозиметр у власно сконструйованому підвісі до БПЛА DJ1 Phantm4

3.2. Проведення тепловізійних досліджень.

У таке кріплення скомпонували тепловізійний пристрій. Для цього для кишенькової тепловізійної камери подали живлення від батареї через USB, підєднали відео передавач частотою 5,8ГГц з передавальною антеною та декодером цифрового сигналу в аналоговий (рис. 3.4). Сигнал від такої системи зчитується будь-яким відповідним додатком типу USB-camera.

Використовували 3 види usb-тепловізорів – TC001, P2Pr Infrared та Victr328C. У всіх них теплова роздільна здатність становить 256*192

точок, частота оновлення до 25Гц, але відрізняється сама лінза, її фокусування та програмна частина.

Зауважимо, що модель Victr328C не спрацювала, живлення брала, але картинку з відео не передавала. Інші 2 моделі працювали коректно.

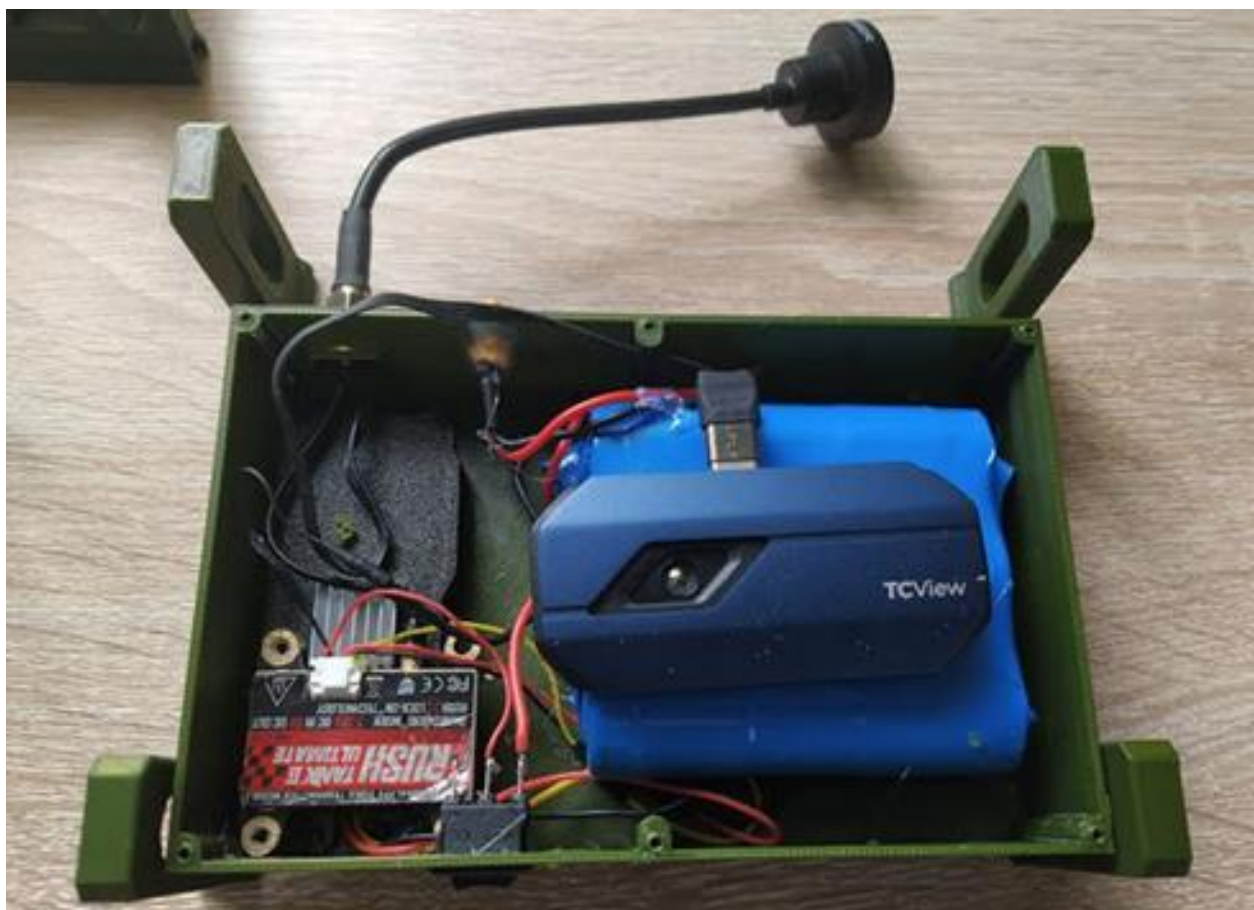


Рисунок 3.4. Розроблена конструкція під'єднання до БПЛА тепловізора з передачею відео.

У тестових польотах така камера давала непогану картинку, але дальність передачі не була високою, 150-200м залежно від наявності перешкод. Тому ми також пробували робити запис теплового відео зі смартфоном у кріпленні у відповідному додатку.

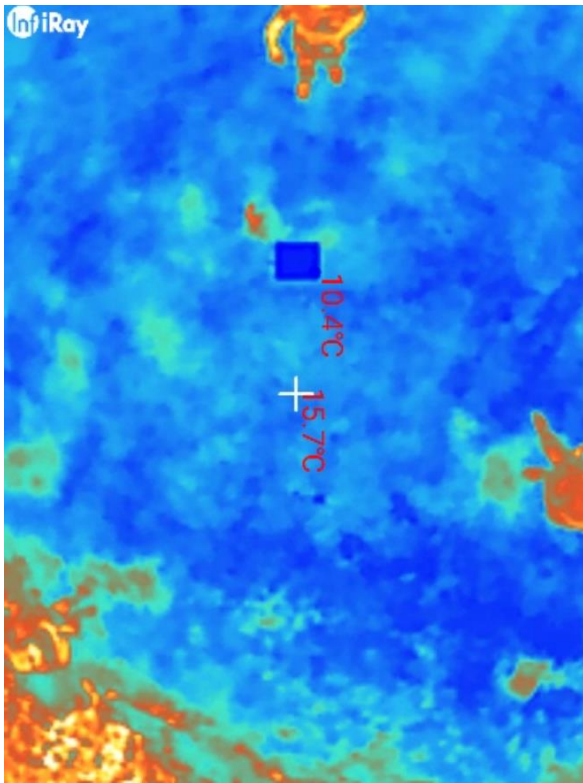
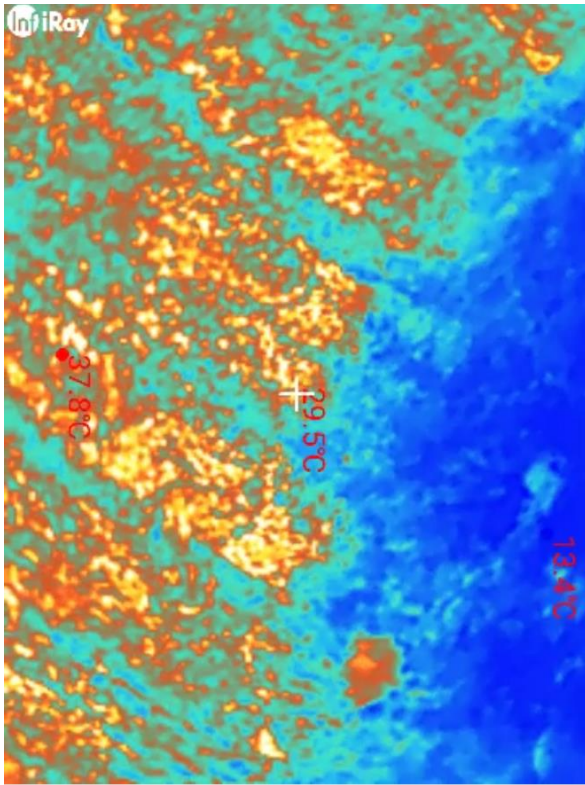


Рисунок 3.5. Отримані теплові зображення з БПЛА

Тут бачимо приклади отриманих теплових зображень. Зйомка проводилась у теплу пору, і чітко видно різницю між сонячною та

затіненою частиною. Смугами тут видно покочену траву. Різниця між найменшою та найбільшою температурою сягає до 15 градусів.

Роздільна здатність камери 256*192, відповідно теплове розрізнення зображень на невеликих висотах може бути 20-30см на піксель. Це очевидно на порядки краще, ніж космічні знімки Landsat-8, Landsat-9 із тепловим розрізненням 100 метрів на піксель. Плюс дрон можна запускати у потрібний собі час, а супутник пролітає раз на 8 днів тільки у ранкові години (у нас це біля 11.10 ранку, відповідно оцінити теплові характеристики в інший час за ним неможливо).

3.3. Тестові польоти з радіометром

В процесі роботи використовували дозиметр GMC-300S, який має «широкий діапазон радіаційних потужностей, забезпечуючи точне вимірювання рівня та дозволяючи провести комплексний аналіз викидів радіаційного фону. Вимірювальний прилад виявляє бета-, гамма- та рентгенівське випромінювання, показуючи значення максимальної дози в мкЗв та мР, діапазон вимірювань від 0,001 мкЗв/год до 1 мкЗв/год, що дозволяє вести контроль протягом певного часу та робить його універсальним для різних застосувань» [32].

Тестові випробування проводили на території ЛНТУ. Спочатку випробували керуваність БПЛА із таким підвісом на різних висотах. В цілому дрон стабілізувався добре, але дещо більше звичайного розхитувався при поривах вітру.



Рисунок 3.6. Тестування підвісу дозиметра у польоті

Самі точки вимірювань визначили заздалегідь із кроком у 30-40м. На кожній точці БПЛА зависав на висоті 1-1,2м на 30 секунд. Це потрібно для покращення точності вимірювань, оскільки одна трубка у цьому дозиметрі може не миттєво реагувати на зміни радіаційного фону, потрібен час для набору даних.



Рисунок 3.7. Тестові польоти з радіометром

У цьому польоті було 18 точок на площі приблизно 2 гектари

3.4. Обробка отриманих даних.

Після польоту прилад зняли, підключили через usb до комп'ютера, і через спеціалізовану програму GMC Data Viewer завантажили отримані дані у форматі csv.

Потім ці дані від формували в Excel та співвіднесли по часу із відповідними точками обльоту.

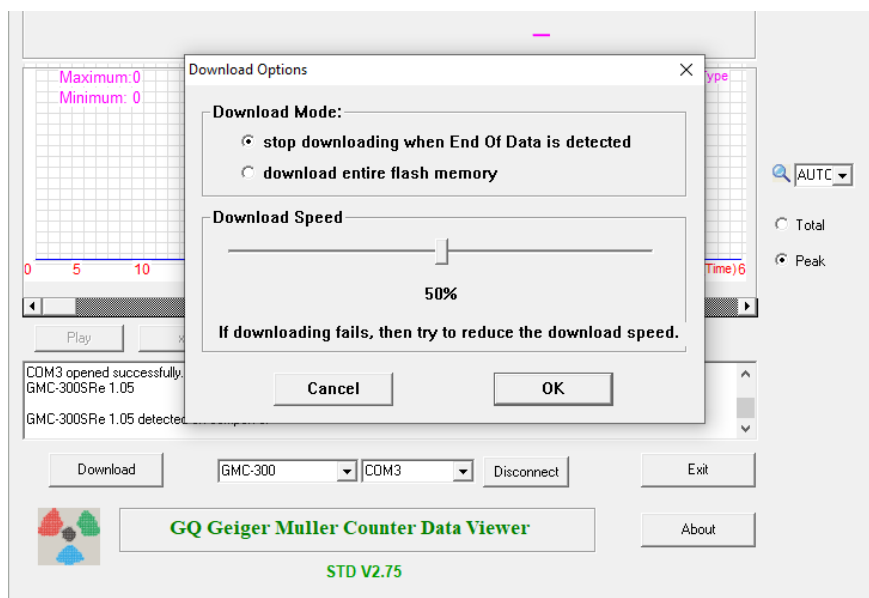
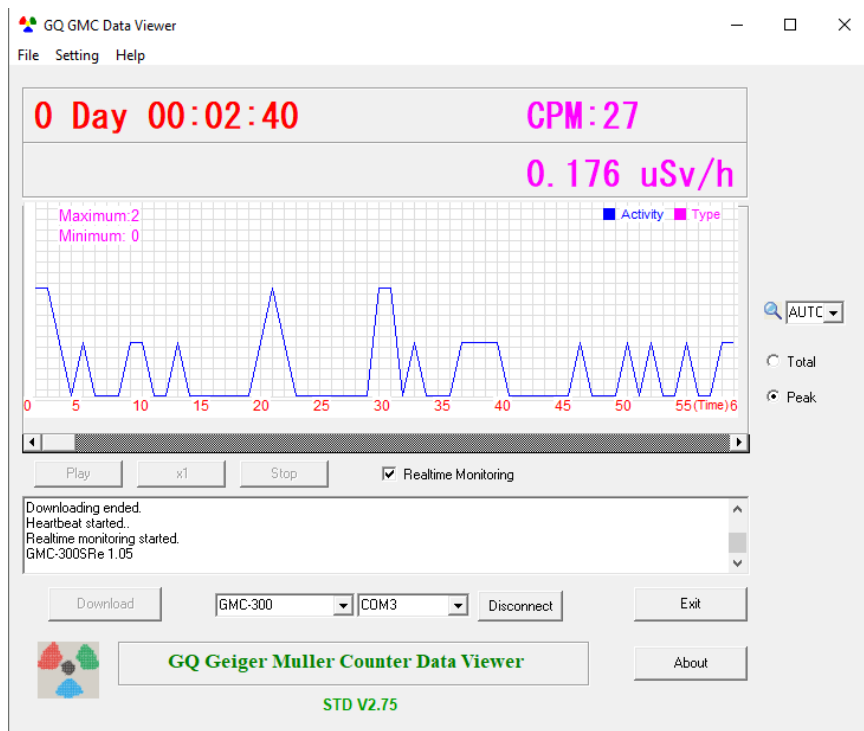


Рисунок 3.8. Інтерфейс програми для зчитування даних радіометра GMC DataViewer

A1 GQ Electronics LLC, GMC Data Viewer, Version 2.75

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O					
1	GQ Electronics LLC, GMC Data Viewer, Version 2.75																		
2	Date Time	Type	uSv/h	CPM	#1(CPS)	#2(CPS)	#3(CPS)	#4(CPS)	#5(CPS)	#6(CPS)	#7(CPS)	#8(CPS)	#9(CPS)	#10(CPS)	#11(CPS)	#12(CPS)	#13(CPS)	#14(CPS)	#15(CPS)
3																			
4	2025-06-23	13:35	Every Second	0.149	23	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2025-06-23	13:36	Every Second	0.201	31	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2025-06-23	13:37	Every Second	0.176	27	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2025-06-23	13:38	Every Second	0.162	25	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2025-06-23	13:39	Every Second	0.182	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	2025-06-23	13:40	Every Second	0.097	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2025-06-23	13:41	Every Second	0.195	30	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	2025-06-23	13:42	Every Second	0.104	16	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	2025-06-23	13:43	Every Second	0.143	22	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	2025-06-23	13:44	Every Second	0.176	27	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2025-06-23	13:45	Every Second	0.189	29	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	2025-06-23	13:46	Every Second	0.176	27	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	2025-06-23	13:47	Every Second	0.189	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	2025-06-23	13:48	Every Second	0.195	30	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	2025-06-23	13:49	Every Second	0.182	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	2025-06-23	13:50	Every Second	0.143	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2025-06-23	13:51	Every Second	0.162	25	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2025-06-23	13:52	Every Second	0.143	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2025-06-23	13:53	Every Second	0.137	21	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	2025-06-23	13:54	Every Second	0.143	22	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	2025-06-23	13:55	Every Second	0.156	24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
23.06.2025 11:29	Every Seco	0,091	14	0	0	1	0	0	0
23.06.2025 11:30	Every Seco	0,117	18	0	0	0	0	1	0
23.06.2025 11:31	Every Seco	0,182	28	1	2	0	0	0	0
23.06.2025 11:32	Every Seco	0,123	19	0	0	0	0	0	1
23.06.2025 11:33	Every Seco	0,097	15	0	0	1	0	0	0
23.06.2025 11:34	Every Seco	0,104	16	0	0	0	1	1	0
23.06.2025 11:35	Every Seco	0,13	20	1	0	0	0	0	1
23.06.2025 11:36	Every Seco	0,117	18	0	0	1	0	1	0
23.06.2025 11:37	Every Seco	0,143	22	0	1	0	1	0	0
23.06.2025 11:38	Every Seco	0,182	28	0	0	3	0	1	0
23.06.2025 11:39	Every Seco	0,143	22	2	0	1	0	0	0
23.06.2025 11:40	Every Seco	0,117	18	0	1	0	0	0	0
23.06.2025 11:41	Every Seco	0,104	16	0	0	0	0	0	0
23.06.2025 11:42	Every Seco	0,149	23	1	0	0	0	1	1
23.06.2025 11:43	Every Seco	0,137	21	1	1	0	1	0	0
23.06.2025 11:44	Every Seco	0,162	25	0	0	0	2	2	0
23.06.2025 11:45	Every Seco	0,149	23	0	0	1	0	0	0
23.06.2025 11:46	Every Seco	0,123	19	0	0	0	1	0	0
23.06.2025 11:47	Every Seco	0,117	18	0	1	0	0	0	0
23.06.2025 11:48	Every Seco	0,156	24	0	0	2	2	0	1
23.06.2025 11:49	Every Seco	0,169	26	0	0	2	1	0	0
23.06.2025 11:50	Every Seco	0,111	17	0	0	0	1	1	0
23.06.2025 11:51	Every Seco	0,097	15	0	1	0	2	0	0
23.06.2025 11:52	Every Seco	0,137	21	1	0	0	1	0	0
23.06.2025 11:53	Every Seco	0,176	27	0	1	0	0	0	1
23.06.2025 11:54	Every Seco	0,143	22	1	1	1	0	2	0
23.06.2025 11:55	Every Seco	0,149	23	0	0	1	2	1	0
23.06.2025 11:56	Every Seco	0,137	21	1	0	0	0	1	0
23.06.2025 11:57	Every Seco	0,117	18	1	0	0	0	0	1
23.06.2025 11:58	Every Seco	0,214	33	0	0	0	0	0	0
23.06.2025 11:59	Every Seco	0,149	23	0	1	0	0	0	0
23.06.2025 12:00	Every Seco	0,189	29	1	1	0	0	0	0

Рисунок 3.9. Вигляд отриманих даних у csv та їх обробка в MS Excel

Як бачимо, в нашому випадку радіаційний фон ніде не перевищував норматив, хоч і змінювався від 0,11 до 0,2 мкЗв/год.

Потім на основі цих даних легко будувати екологічні карти. Тут ми використали програму Surfer для побудови карти ізоліній.

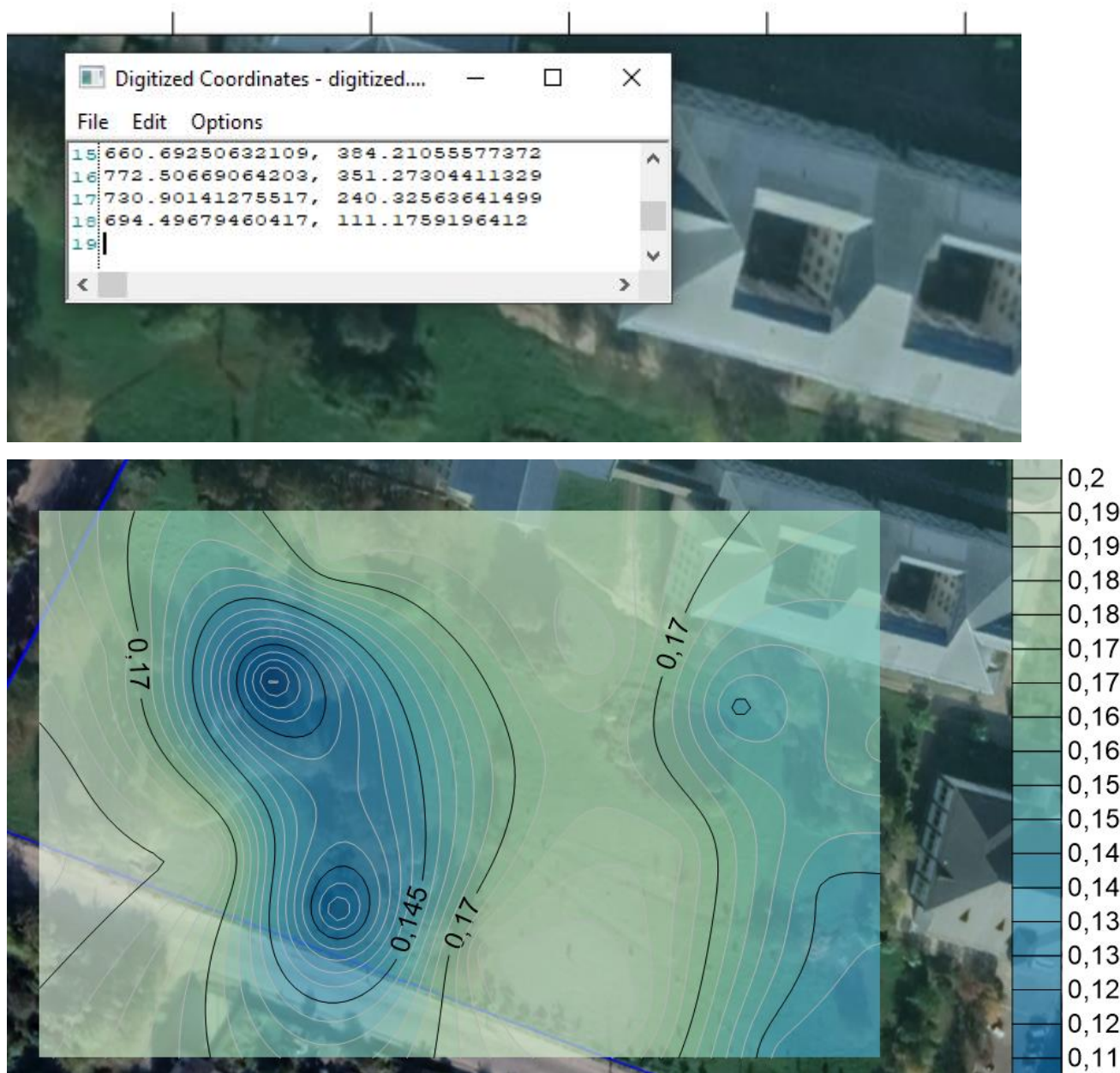


Рисунок 3.10. Приклад оцифрування точок та побудови карти ізоліній радіаційного фону у програмі GS Surfer.

Такі карти допомагають виявити просторові закономірності розподілу екологічних значень. А використання дронів при таких

вимірюваннях суттєво економить час та дозволяє провести заміри там, куди фізично важко дістатись.

ВИСНОВКИ

Полеві екологічні дослідження лишаються незамінними, але можуть бути значно вдосконалені дистанційними методами.

Застосування БПЛА дозволяє проводити точніші вимірювання температури поверхні параметрів повітря, радіаційного фону тощо. При цьому це можливо і у важкодоступних місцях.

У своїй роботі ми пристосували до вимірювань БПЛА Phantom4, розробивши систему кріплень та підвісу для приладів. Створено систему дистанційного тепловізійного спостереження та оцінки радіаційного фону.

Розроблені системи апробовані в польових умовах і можуть бути в подальшому застосовані в екологічних дослідженнях.

Надалі планується розробка та апробація технології дистанційного відбору проб та зразків за допомогою БПЛА.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Моніторинг довкілля. Методичні вказівки для здобувачів освіти І бакалаврського рівня. URL: <https://metd.vntu.edu.ua/getfile.php/9748.pdf>
2. Як працюють датчики якості повітря: принципи дії та типи сенсорів. <https://z-wave.cm.ua/ua/a514089-kak-rabtayut-datchiki.html>
3. Електрохімічні сенсори С: принцип роботи, конструкція та застосування. <https://uk.winsen-sensr.cm/knowledge/electrchemical-c-sensrs.html?ysclid=meim658s58550634813>
4. Модуль електрохімічного виявлення ZE12A. https://uk.winsen-sensr.cm/prduct/ze12a.html?gad_surce=1
5. Модуль NDIR C19 MH-Z2E - uk.winsen-sensr.cm. https://uk.winsen-sensr.cm/prduct/mh-z19e.html?gad_surce=1
6. Netvx RA0716 сенсор PM2.5/Температура/Вологість в Україні. <https://shp-gsm.ua/prducts/netvx-ra0716/>
7. Уніфікована серія електрохімічних газових сенсорів нового покоління. <https://electrchemistry.kpi.ua/sites/default/files/sensr.pdf>
8. Nitrogen Dixide Sensrs | N2 Sensr Mdules | Alphasense. <https://www.alphasense.cm/prducts/view-by-target-gas/nitrngen-dixide-sensrs-n2>
9. Промислові газові сенсори Hneywell Analytics. <https://gastech.cm.ua/UA/prmyslvi-gazvi-datchyky-hneywell-analytics/>
10. ЛУЦАК АНДРІЙ РУСЛАНОВИЧ Методи калібрування IoT сенсорів для <https://dSPACE.wunu.edu.ua/bitstreams/9cc9ad55-9880-4806-a458-729638f37940/dwnlad>
11. «Небесна фортеця»: українські інженери створили мережу з майже 10 000 <https://dev.ua/news/akustychni-sensry-1722591167>
12. Обробка сигналів для виявлення повітряних цілей | Комп'ютерні <https://jktd.dnnu.edu.ua/article/view/18704>

13. Принцип роботи електрохімічного детектора газу - Блог.
<https://ua.gvda-instrument.com/inf/the-wrking-principle-f-electrchemical-gas-d-101293020.html>

14. A measurement system for CO₂ and CH₄ emissions quantification for ...
<https://amt.copernicus.org/articles/17/4471/2024/>

15. Application of Unmanned Aerial Vehicle observation for ... - MDPI.
<https://www.mdpi.com/2073-4433/16/6/713>

16. Перехресна чутливість – Газоаналізатори+.
<https://gastech.com.ua/UA/perehresna-chutlyvist/>

17. Технічні обмеження коптерів. <https://jablunia.org/tehnichni-bmezheniya-kopteriv-2e8e24df699841698a1e3411b8a17605>

18. Правила польотів дронів в Україні 2025 – що потрібно знати.
<https://mydrone.com.ua/pravila-pltiv-drniv-v-ukraini/>

19. Закон про дрони в Україні: повний гід на 2025 рік.
<https://hmester.com.ua/zakn-pr-drny-v-ukrayini-pvnyj-gid-na-2025-rik/>

20. Правові аспекти використання дронів в Україні: регулювання та ...
<https://justice.dp.ua/ua/pravvi-aspekti-vikristannya-drniv-v-ukrayini-regulyuvannya-ta-vidpvidalnist/>

21. Дослідження методів стабілізації відео та будови гіростабілізованих <https://dSPACE.kntu.kr.ua/items/a0c2927a-dfd2-437f-9081-841d42184e70>

22. СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМ: СТАН І ...
https://pmap.dnntu.edu.ua/sites/uplad/articles/09_tmchuk_b.pdf

23. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ АТ.
https://www.penaccess.org.ua/data/blg_dwnl/Analitichna_zapiska_atmsferne_pvi_trya.pdf

24. Електроніка БПЛА | Вибір компонентів для дронів.
<https://netgate.kiev.ua/tekhnlgi/15936-vibir-elektrniki-dlya-bpla/>

25. КОМПЛЕКТ СЕНСОРІВ. <https://airunit.cm.ua/sensr-package/>
26. Геніальність стратегії двох траєкторій безпілота SUPER. <https://qudata.cm/uk/news/genius-super-drnes-tw-trajectory-strategy/>.
27. Koparan, Cengiz, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Assisted Water Sampling" (2016). All Theses. 2461. https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2461
28. Villa TF, Salimi F, Morton K, Morawska L, Gonzalez F. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. *Sensors*. 2016; 16(12):2202.
29. Wu, J., Deng, W., Huang, F., Song, X., Li, L., & Zhai, Z. (2025). Development of a UAV-assisted autonomous water sampling device. *Discover Applied Sciences*, 7(3), 1-15.
30. Massoum, S. F., Feng, C., & Liu, H. H. T. (2025). AquaFly Project: Autonomous Multi-Drone Water Sampling with a Payload Deployment and Retraction Mechanism. *Unmanned Systems*, 13(03), 943-955.
31. Kurunathan, H., Huang, H., Li, K., Ni, W., & Hossain, E. (2023). Machine learning-aided operations and communications of unmanned aerial vehicles: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26(1), 496-533.
32. Almalki, F. A., Alsamhi, S. H., Sahal, R., Hassan, J., Hawbani, A., Rajput, N. S., ... & Breslin, J. (2023). Green IoT for eco-friendly and sustainable smart cities: future directions and opportunities. *Mobile Networks and Applications*, 28(1), 178-202.
33. Macrina, G., Pugliese, L. D. P., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020). Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102762.