

Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола
Відділення сфери послуг

Циклова комісія геодезії, фінансів та
загальнооекономічних дисциплін

ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ

на тему: «Використання БПЛА при плануванні та розвитку території,
містобудуванні, екологічному моніторингу»
«UAVs in planning and development of the territory, urban planning, environmental
monitoring»

Виконала:

*студентка IV курсу групи ГЗ-41
спеціальності 193 Геодезія та
землеустрій
Надія БОДНАР*

Науковий керівник:

*викладач ЦК геодезії, фінансів
та загальнооекономічних дисциплін
Сергій КУРБЕЦЬКИЙ*

**Дипломний проєкт допущено до
захисту:**

«___»_____2026р.

Захист відбувся:

«___»_____2026р.

Оцінка _____

Тернопіль, 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1 Теоретичні та правові основи використання БПЛА в плануванні та розвитку територій.....	6
1.1 Сутність, мета та роль безпілотних літальних апаратів у плануванні та розвитку територій.....	6
1.2 Класифікація БПЛА та їх функціональні можливості.....	12
1.3 Використання БПЛА у містобудуванні та екологічному моніторингу як шлях до сталого розвитку.....	15
Висновки до розділу 1.....	19
Розділ 2 Механізм застосування та проблемно-аналітичні аспекти використання БПЛА.....	21
2.1 Аналіз сучасного стану використання БПЛА у плануванні територій..	21
2.2 Проблеми та обмеження застосування БПЛА.....	24
2.3 Порівняльний аналіз традиційних методів і БПЛА.....	28
2.4 Узагальнення результатів аналізу використання БПЛА у плануванні територій.....	32
Висновки до розділу 2.....	34
Розділ 3 Аналіз та оптимізація функціонування об'єктів планування територій із застосуванням БПЛА	36
3.1 Технологічні особливості використання БПЛА у проєктах розвитку та планування територій.....	36
3.2 Методика геопросторового аналізу та моніторингу територіальних ресурсів.....	40
3.3 Техніко-економічна ефективність та перспективи впровадження безпілотних технологій у геодезичне виробництво.....	45
3.4 Обґрунтування шляхів підвищення ефективності застосування БПЛА у планувальних роботах.....	49
Висновки до розділу 3.....	55

Висновки.....	57
Список використаних джерел.....	60

ВСТУП

Сучасний етап розвитку геодезії, землеустрою та містобудування характеризується активним впровадженням цифрових технологій збору, обробки та аналізу просторових даних. Зростання вимог до точності, оперативності та актуальності геоінформації зумовлює необхідність використання інноваційних методів виконання топографо-геодезичних робіт. У цьому контексті особливе значення набувають безпілотні літальні апарати (БПЛА), які забезпечують швидке отримання високодеталізованих просторових даних та суттєво підвищують ефективність виконання польових і камеральних робіт. Використання БПЛА є особливо актуальним у сфері планування територій, моніторингу земельних ресурсів та містобудівного проєктування, де необхідно постійно оновлювати інформацію про стан забудови, інфраструктури та природного середовища. Інтеграція результатів аерозйомки у геоінформаційні системи (ГІС) створює умови для комплексного просторового аналізу та підвищує якість управлінських рішень. Питання застосування БПЛА у геодезії та суміжних галузях розглядаються у працях вітчизняних та зарубіжних науковців, які досліджують технології аерофотозйомки, фотограмметричної обробки даних, GNSS-технології та методи просторового моделювання. Водночас швидкий розвиток безпілотних систем та програмного забезпечення зумовлює необхідність подальшого узагальнення сучасних підходів та визначення напрямів підвищення ефективності їх використання.

Метою дипломної роботи є дослідження особливостей застосування безпілотних літальних апаратів у геодезії, землеустрої та плануванні територій, а також обґрунтування шляхів підвищення ефективності їх використання в сучасних умовах цифрової трансформації просторових даних.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан розвитку та використання безпілотних літальних апаратів у геодезії, землеустрої та містобудуванні;
- дослідити теоретичні основи функціонування БПЛА та їх роль у системі збору просторових даних;

- розглянути технологічні особливості виконання аерозйомочних робіт із застосуванням безпілотних систем;
- проаналізувати сучасні методи фотограмметричної обробки даних, отриманих за допомогою БПЛА;
- дослідити можливості інтеграції результатів аерозйомки у геоінформаційні системи (ГІС);
- визначити основні проблеми, обмеження та ризики використання безпілотних технологій у практичній діяльності;
- обґрунтувати напрями підвищення ефективності застосування БПЛА в планувальних та геодезичних роботах;
- окреслити перспективи подальшого розвитку безпілотних технологій у сфері просторового аналізу та містобудування.

Об'єктом дослідження є процеси збору, обробки та використання геопросторових даних у геодезії, землеустрої та містобудування. Предметом дослідження є методи та технології застосування безпілотних літальних апаратів для отримання, обробки та використання просторової інформації. У роботі використано системний підхід, методи порівняльного та структурного аналізу, узагальнення наукових джерел, а також елементи фотограмметричного опрацювання даних і геоінформаційного моделювання.

Практичне значення полягає у можливості використання результатів дослідження для підвищення ефективності виконання геодезичних і містобудівних робіт, оптимізації процесів аерозйомки, а також удосконалення методів отримання та обробки просторових даних.

Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, 2 таблиць, висновків та списку використаних джерел

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА У ПЛАНУВАННІ ТА РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ

1.1 Сутність, мета та роль безпілотних літальних апаратів у плануванні територій

У сучасній науковій літературі, присвяченій містобудуванню, геодезії та землеустрою, безпілотні літальні апарати (БПЛА) розглядаються як складні інтегровані роботизовані системи, які забезпечують парадигмальний перехід від традиційних дискретних методів наземної геодезії до безперервних цифрових стратегій просторового управління територіями [1]. Сутність БПЛА в контексті просторового розвитку полягає не лише у технічній можливості дистанційно керованого польоту апарата без пілота на борту, а у його функціональній спроможності виступати динамічним носієм високотехнологічних сенсорів. До них належать мультиспектральні та гіперспектральні камери, лазерні сканери (LiDAR), тепловізійні модулі та інтегровані геодезичні приймачі високої точності, що працюють у режимах кінематики реального часу (RTK) та кінематики з наступною обробкою даних (PPK) [2]. З теоретичної та практичної точок зору планування територій БПЛА слід класифікувати як мобільні та автономні елементи геоінформаційної інфраструктури. Їхня сутність визначається високою маневреністю, можливістю оперативної дислокації, здатністю до виконання польотних місій у важкодоступних або небезпечних для людини зонах, а також здатністю генерувати надвеликі масиви первинних просторових даних. Ці дані після математичної та фотограмметричної обробки трансформуються у високоточні цифрові моделі рельєфу та цифровий моделі місцевості [3].

У сучасному містобудівному проєктуванні збір даних за допомогою безпілотних систем дозволяє реалізувати концепцію цифрових двійників (Digital Twins), міст та територіальних громад, які є найвищою формою

інтегрованого просторового моделювання [3]. На відміну від статичних двовимірних карт, цифровий двійник території є динамічною тривимірною системою. На базі таких моделей стає можливим впровадження інтегрованих архітектурних рішень, як-от City Information Modeling – інформаційне моделювання міст та Building Information Modeling – інформаційне моделювання будівель, де БПЛА виступають головним інструментом первинного збору даних та верифікації геометричних параметрів міського середовища. Головною метою використання БПЛА у сфері територіального планування є подолання хронічного інформаційного дефіциту та усунення неактуальності наявних картографічних матеріалів. Процес розробки комплексних планів просторового розвитку територій громад та генеральних планів населених пунктів в Україні часто гальмується або стає нелегітимним через використання застарілих топографічних основ 10–15-річної давнини, які не відображають реальних змін у забудові та ландшафті [4]. Застосування БПЛА дозволяє оперативно отримати актуальну просторову основу, яка повністю відповідає вимогам чинного законодавства, зокрема Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [5] та Повітряного кодексу України [6]. Мета застосування БПЛА у плануванні територій носить багатокритеріальний характер і структуризується за чотирма основними векторами: інформаційним, управлінським, економічним та прогнозним (Таблиця 1.1).

Системна роль безпілотних технологій у плануванні та розвитку територій носить наскрізний характер і охоплює всі без винятку етапи життєвого циклу територіальної одиниці — від концептуального аналізу інвестиційної привабливості до моніторингу експлуатації збудованих об’єктів інфраструктури.

Технологічна сутність використання БПЛА базується на сучасних методах обробки даних, серед яких провідне місце посідає цифрова close-range фотограмметрія [7]. На відміну від простої фіксації та створення художніх знімків, професійна аерофотозйомка з БПЛА виконується за чітко

розрахованими польотними місіями із забезпеченням високих показників поздовжнього та поперечного перекриття кадрів (як правило, на рівні 70–80%).

Таблиця 1.1 – Стратегічна мета застосування БПЛА у просторовому плануванні

Інформаційний вектор	отримання об’єктивної, деталізованої та актуальної інформації про стан забудови, інженерних мереж;
управлінський вектор	створення бази для прийняття легітимних рішень щодо відведення земельних ділянок, зміни їх цільового призначення та контролю за дотриманням містобудівних регламентів [5];
економічний вектор	радикальне зниження собівартості аерофотознімальних робіт порівняно з пілотованою авіацією та супутниковими знімками високої роздільної здатності;
прогнозний вектор	моделювання наслідків антропогенного впливу на територію, оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій (затоплення, зсуви) та візуалізація майбутніх об’єктів будівництва у реальному просторовому контексті [6].

Це дозволяє спеціалізованому програмному забезпеченню (алгоритми Structure-from-Motion) автоматично знаходити спільні точки на суміжних кадрах, розраховувати параметри внутрішнього та зовнішнього орієнтування камер та відновлювати точну тривимірну геометрію простору [7].

Процес обробки та перетворення сирих просторових даних у містобудівні матеріали складається з кількох послідовних математичних та технологічних етапів, а саме калібрування та вирівнювання знімків (Аеротріангуляція), генерація щільної хмари точок (Dense Point Cloud), тріангуляція, класифікація хмари точок (для LiDAR та фотограмметрії), експорт фінальних продуктів. Це перетворює набір плоских растрових зображень на інтелектуальну, просторово прив’язану метричну карту, де кожен піксель має унікальні географічні та

геодезичні координати у державній системі координат УСК-2000 [1]. Така деталізація дає змогу органам архітектури та містобудування проводити віртуальні просторові інспекції територій, здійснювати точні лінійні та об'ємні вимірювання, не виходячи з робочого кабінету, що суттєво підвищує загальну прозорість управління та мінімізує корупційні ризики (Таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Роль безпілотних технологій у розвитку та моніторингу територій

Роль у моніторингу землекористування	БПЛА дозволяють виявляти порушення, які неможливо зафіксувати при наземних обходах. Це включає самовільне будівництво, розширення меж ділянок за рахунок земель комунальної власності, виявлення стихійних сміттєзвалищ та кар'єрів [8]. Завдяки періодичному моніторингу місцева влада отримує інструмент оперативного реагування на будь-які зміни в ландшафті;
роль у проектуванні інженерної інфраструктури	при плануванні лінійних об'єктів (доріг, ЛЕП, трубопроводів) використання дронів, оснащених LiDAR, дозволяє «бачити» крізь рослинність, створюючи ідеальну модель земної поверхні. Це критично важливо для розрахунку обсягів земляних робіт та проектування дренажних систем [9];
екологічна та природоохоронна роль	розвиток територій неможливий без збереження екосистем. БПЛА використовуються для інвентаризації зелених насаджень, оцінки стану водних об'єктів та аналізу теплових аномалій у міських агломераціях («острови тепла») [10];

Продовження таблиці 1.2

роль у гуманітарному розмінуванні та відновленні	В умовах повоєнного розвитку України роль БПЛА стає життєво необхідною. Вони використовуються для первинного обстеження територій на наявність вибухонебезпечних предметів (за допомогою тепловізорів та магнітометрів), а також для точної фіксації руйнувань житлового фонду з метою розрахунку збитків[11].
--	--

Аналіз наведених функціональних напрямів свідчить про те, що безпілотні літальні апарати виконують роль фундаментального технологічного містка між фізичним простором та геоінформаційними системами (ГІС) територіальних громад [1]. Інтеграція матеріалів БПЛА- зйомки у сучасне геоінформаційне середовище, яке дозволяє реалізувати багатошаровий принцип структурування просторових даних. Кожен експортований з безпілотної цифровий продукт, від ортофотоплану до векторних контурів будівель автоматично позиціонується як окремий тематичний шар. Він накладається на чинні юридичні межі земельних ділянок, або схеми планування територій [4]. І це створює синергетичний ефект, коли сухі цифрові дані кадастру отримують миттєве візуальне та метричне підтвердження з повітря [8].

Визначання ролі БПЛА у містобудуванні, є методологія математичної верифікації та забезпечення геометричної точності отриманих моделей [1]. Попри використання інтегрованих RTK/PPK модулів, у професійній геодезичній практиці обов'язковим залишається використання наземних опорних точок. Ці точки рівномірно закладаються на місцевості до початку польоту та координуються за допомогою двочастотних GNSS-приймачів у стаціонарних або кінематичних режимах [2]. Під час фотограмметричної обробки програмне забезпечення використовується для жорсткої геодезичної прив'язки та усунення можливих системних деформацій блоку

аеротріангуляції [7]. Такий жорсткий математичний контроль гарантує, що похибка фінального ортофотоплану не перевищуватиме встановлених інструкціями лімітів для відповідного масштабу зйомки, що робить ці матеріали легітимними для розробки містобудівної документації [5]. Окрім технічної складової, впровадження безпілотних комплексів у практику просторового планування суттєво трансформує саму філософію муніципального менеджменту. Оперативність збору даних за допомогою БПЛА дозволяє відійти від застарілої практики реактивного управління до стратегії проактивного моніторингу та моделювання [10]. Можливість виконання швидких повторних зйомок забезпечує органи місцевого самоврядування динамічними рядами даних, за якими можна оцінювати реальні темпи деградації чи розвитку міських просторів та моделювати гідродинамічні процеси у разі критичних злив [6]. Таким чином, сутність БПЛА у плануванні територій полягає в їхній здатності інтегрувати процеси швидкого збору просторових даних із сучасними ГІС-технологіями, забезпечуючи органи управління, девелоперів та землевпорядників оперативною та юридично достовірною інформацією для сталого просторового розвитку [1]. Наявність детальних цифрових моделей місцевості, отриманих з безпілотних платформ, мінімізує людський фактор при проведенні інвентаризаційних робіт, оптимізує витрати місцевих бюджетів на польові дослідження та створює прозору цифрову екосистему для залучення інвестицій у розвиток інфраструктури територіальних громад [4].

1.2 Класифікація БПЛА та їх функціональні можливості

У сучасних умовах безпілотні літальні апарати стали ефективним інструментом збору просторових даних для планування та розвитку територій [7]. Їх різноманіття визначається технічними характеристиками та

специфікою завдань, тому доцільно розглядати БПЛА не як один тип техніки, а як набір рішень, адаптованих під конкретні потреби містобудування. Ефективність застосування дрона залежить від конструкції апарата, типу встановленого обладнання та точності навігації [3]. З конструктивної точки зору найбільш поширеними є мультироторні дрони, вони мають вертикальний зліт і посадку, здатні працювати у щільній міській забудові та забезпечують можливість зависання для детальної зйомки фасадів і невеликих ділянок [8] (Рисунок 1.1). Недоліком є обмежений час польоту, зазвичай 30–50 хвилин. Типова маса таких апаратів у професійному сегменті становить приблизно від 0,5 до 5–7 кг, хоча окремі моделі можуть бути як легшими, так і важчими залежно від встановленого обладнання [12].



Рисунок 1.1 – Мультироторні дрони

Наступний тип — це літакові БПЛА, які призначені для тривалого польоту та охоплення великих територій [2]. Вони дозволяють швидко охоплювати площі понад 500–1000 га, але потребують злітно-посадкової смуги і складніші у маневруванні в місті (Рисунок 1.2). Маса таких апаратів зазвичай коливається в межах від 3 до 20 кг і більше, залежно від конструкції та типу сенсорів.

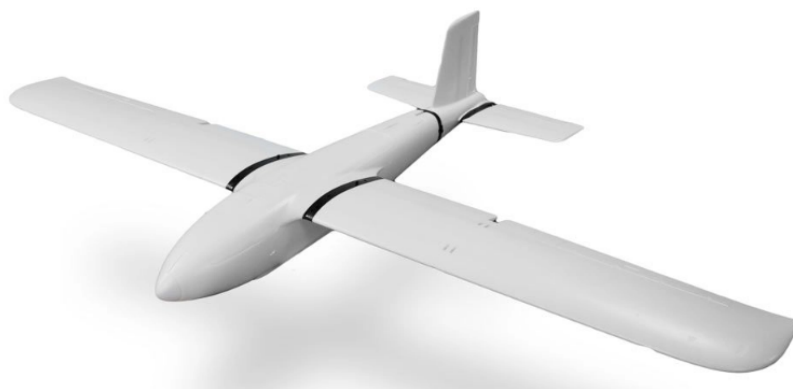


Рисунок 1.2 – Літакові БПЛА

Також виділяють гібридні системи VTOL, які поєднують характеристики мультироторних і літакових апаратів. Вони виконують вертикальний зліт і горизонтальний політ, що робить їх універсальними для приміських та віддалених територій [3] (Рисунок 1.3). Маса таких систем зазвичай становить від 5 до 15 кг, однак може змінюватися залежно від конструктивного виконання та цільового призначення.



Рисунок 1.3 – Гібридні системи VTOL

Ефективність збору даних безпосередньо визначає сенсорне обладнання: оптичні камери (RGB) забезпечують детальні 3D-моделі місцевості; LiDAR дозволяє отримувати точні цифрові моделі рельєфу навіть у лісистих зонах [2,

13] (Рисунок 1.4); мультиспектральні сенсори допомагають оцінювати стан рослинності та екологічний стан території [8].

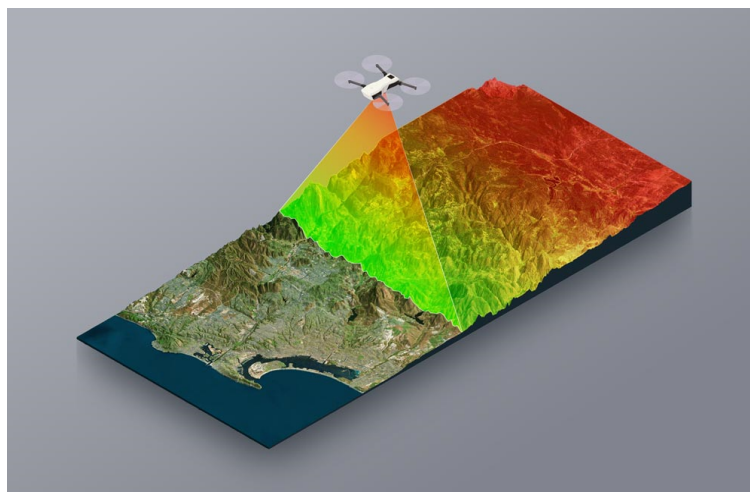


Рисунок 1.4 – LiDAR)

Точність визначення координат забезпечується системами RTK та РРК [2, 14] (Рисунок 1.5). RTK працює у реальному часі через базову станцію, а РРК уточнює дані після польоту, що особливо корисно у зонах із слабким зв'язком.

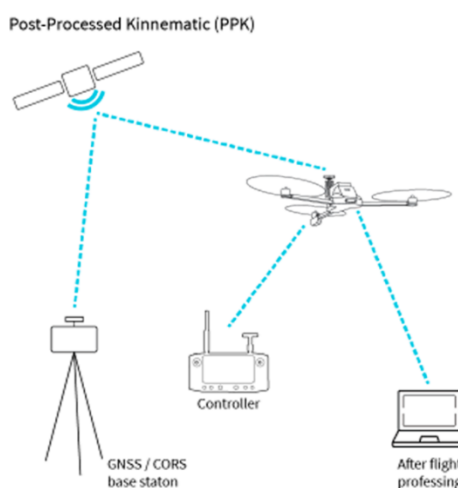


Рисунок 1.5 – Системи RTK та РРК

В Україні БПЛА класифікуються за масою відповідно до авіаційних правил, що визначає їхню легальну експлуатацію [6]. Найбільш поширеними у

містобудівній практиці є апарати середнього класу (від 250 г до 20 кг), які поєднують достатню функціональність і відносну простоту використання. Вибір БПЛА для містобудівних задач залежить від поєднання конструкції, сенсорів та точності навігації. Комплексне використання різних типів апаратів дозволяє значно підвищити ефективність збору просторових даних [1].

1.3 Використання БПЛА у містобудуванні та екологічному моніторингу як шлях до сталого розвитку

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій та цифровізації суспільства особливого значення набуває використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різних галузях господарської діяльності [1]. Однією з найбільш перспективних сфер застосування БПЛА є містобудування та екологічний моніторинг [3, 10]. Дрони забезпечують оперативне отримання просторової інформації, високу точність даних та ефективність проведення моніторингових робіт [5]. Завдяки цьому використання БПЛА сприяє реалізації концепції сталого розвитку, яка передбачає збалансоване поєднання економічного розвитку, охорони довкілля та підвищення якості життя населення [15, 16]. Безпілотні літальні апарати є сучасними технічними засобами дистанційного зондування Землі, які здатні виконувати аерофотозйомку та збір просторових даних без безпосередньої участі людини на борту літального апарата [1, 5]. Вони оснащуються цифровими камерами, тепловізорами, лазерними сканерами, GPS-приймачами, мультиспектральними сенсорами та іншими приладами, які дозволяють отримувати високоточну інформацію про стан територій і об'єктів [2]. Використання таких технологій значно розширює можливості аналізу та управління територіями [4]. У містобудуванні БПЛА використовуються для проведення топографо-геодезичних робіт, створення цифрових карт та моделей місцевості [2, 9].

Отримані за допомогою дронів дані дозволяють формувати ортофотоплани високої точності, які використовуються при розробленні генеральних планів населених пунктів, схем планування територій та проєктів землеустрою [3]. На відміну від традиційних методів аерофотозйомки, застосування БПЛА є дешевшим та швидшим способом отримання актуальної інформації [17].

Однією з ключових переваг використання БПЛА є можливість оперативного оновлення просторових даних [8]. У сучасному містобудуванні інформація про території швидко змінюється через активну забудову, реконструкцію інфраструктури та розвиток транспортних мереж [15]. Використання дронів дозволяє регулярно проводити аерозйомку та своєчасно оновлювати геоінформаційні бази даних [4]. Це забезпечує більш ефективне управління територіями та прийняття обґрунтованих управлінських рішень [18]. БПЛА також широко використовуються для створення тривимірних моделей міст і окремих об'єктів [5]. Технології фотограмметрії дають змогу створювати детальні 3D-моделі будівель, доріг, мостів та інших інженерних споруд [9]. Такі моделі застосовуються для аналізу щільності забудови, оцінки інсоляції територій, моделювання транспортних потоків та планування розвитку міської інфраструктури [18]. Крім того, тривимірне моделювання допомагає візуалізувати майбутні будівельні проєкти та оцінювати їх вплив на навколишнє середовище [16]. Важливим напрямом використання БПЛА вважається контроль за будівництвом та експлуатацією об'єктів [9]. За допомогою дронів можна здійснювати регулярний моніторинг будівельних майданчиків, контролювати дотримання проєктної документації та виявляти порушення містобудівного законодавства [13]. Аерофотозйомка дозволяє фіксувати зміни на території будівництва, оцінювати обсяги виконаних робіт і контролювати строки реалізації проєктів [1]. Це підвищує ефективність управління будівельними процесами та сприяє зменшенню фінансових ризиків. Особливо актуальним є використання БПЛА для моніторингу незаконного будівництва та несанкціонованого використання земель [10]. Дрони дозволяють швидко виявляти самовільно збудовані об'єкти, зміни меж земельних ділянок

та порушення режиму використання територій [6]. Отримані дані можуть використовуватися органами місцевого самоврядування, кадастровими службами та екологічними інспекціями для контролю за дотриманням законодавства [13].

Крім містобудування, БПЛА відіграють важливу роль у сфері екологічного моніторингу [11]. Екологічний моніторинг передбачає систематичне спостереження за станом навколишнього середовища, оцінку рівня його забруднення та прогнозування можливих змін [16]. Традиційні методи екологічного контролю часто є тривалими та потребують значних ресурсів [5]. Використання БПЛА дозволяє автоматизувати процес збору екологічної інформації та забезпечити високу оперативність отримання результатів [1]. Одним із основних напрямів екологічного моніторингу є контроль стану атмосферного повітря [13]. Дрони можуть оснащуватися спеціальними датчиками для вимірювання концентрації шкідливих речовин у повітрі, зокрема вуглекислого газу, метану, пилу та інших забруднювачів [5]. Це особливо важливо для промислових регіонів та великих міст із високим рівнем антропогенного навантаження [16]. Отримані дані дозволяють своєчасно виявляти джерела забруднення та розробляти заходи щодо покращення екологічної ситуації [14]. Також БПЛА широко застосовуються для моніторингу водних ресурсів. За допомогою аерофотозйомки та спеціальних сенсорів можна оцінювати стан річок, озер, водосховищ та прибережних територій. Дрони допомагають виявляти забруднення води, несанкціоновані скиди відходів та зміни берегової лінії. Використання БПЛА значно спрощує проведення досліджень у важкодоступних або небезпечних районах [19].

Важливе значення БПЛА мають у моніторингу стану лісів та природних екосистем. Завдяки дронам можна оперативно виявляти незаконні вирубки, лісові пожежі, осередки всихання дерев та поширення шкідників [20]. Мультиспектральна зйомка дозволяє оцінювати стан рослинності та рівень деградації екосистем [1]. Це сприяє ефективнішому управлінню природними ресурсами та збереженню біорізноманіття [16]. У сільському господарстві

БПЛА використовуються для реалізації технологій точного землеробства [21]. Дрони допомагають контролювати стан посівів, визначати рівень вологості ґрунтів, виявляти хвороби рослин та оцінювати врожайність [10]. Отримані дані дозволяють оптимізувати використання добрив, засобів захисту рослин та водних ресурсів, що сприяє підвищенню продуктивності аграрного виробництва та зменшенню негативного впливу на довкілля [16]. Наступним напрямом застосування БПЛА є моніторинг наслідків природних катастроф та надзвичайних ситуацій. Дрони використовуються під час оцінки масштабів повеней, пожеж, зсувів, землетрусів та техногенних аварій [11]. Вони дозволяють швидко отримати інформацію про стан територій, визначити масштаби руйнувань та організувати рятувальні роботи [22]. Також БПЛА забезпечують можливість моніторингового обстеження територій, небезпечних для перебування людей [1]. Використання БПЛА має значні економічні переваги. У порівнянні з традиційними методами аерофотозйомки та моніторингу, використання дронів потребує менших фінансових витрат і людських ресурсів [1]. Водночас висока точність отриманих даних забезпечує ефективніше управління територіями та ресурсами [4]. Це є важливим фактором для забезпечення сталого розвитку міст і регіонів [16].

Незважаючи на численні переваги, використання БПЛА має і певні обмеження [22]. До основних проблем належать залежність від погодних умов, обмежений час польоту, необхідність спеціальної підготовки операторів та питання правового регулювання використання повітряного простору [22]. Крім того, важливими є питання захисту персональних даних та інформаційної безпеки під час проведення аерозйомки [13]. Тому подальший розвиток технологій БПЛА потребує вдосконалення нормативно-правової бази та розроблення сучасних стандартів використання безпілотних систем [13, 22]. БПЛА забезпечують оперативне отримання точних просторових даних, підвищують ефективність управління територіями та сприяють збереженню навколишнього середовища [10]. Їх застосування дозволяє реалізовувати принципи сталого розвитку, забезпечуючи раціональне використання

природних ресурсів, екологічну безпеку та покращення якості життя населення [14, 16].

Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи розглянуто теоретичну базу застосування безпілотних літальних апаратів у питаннях планування та просторового розвитку територій. Виявлено, що БПЛА є сучасним високотехнологічним засобом для отримання просторових відомостей, який уможливорює швидке надходження своєчасної, достовірної та детальної інформації про стан тих чи інших територій. Завдяки поєднанню аерофотознімання, фотограмметрії, лазерного сканування (LiDAR), а також технологій RTK і PPK, безпілотні системи надають можливість будувати ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу й поверхні, а також тривимірні моделі окремих об'єктів і цілих територій.

Проведений аналіз засвідчив, що використання безпілотників сприяє підвищенню результативності містобудівного проектування, управління земельними ресурсами та відстеженню стану територій. Запровадження безпілотних технологій дає змогу вчасно фіксувати зміни в характере використання земель, контролювати процеси забудови, проводити перевірку наявності та стану об'єктів інфраструктури, а також формувати актуальне інформаційне підґрунтя для ухвалення управлінських рішень.

У розділі також подано класифікацію БПЛА за їхньою конструкцією, функціональними можливостями та технічними параметрами. Визначено, що обрання конкретного типу безпілотного апарата залежить від характеру поставлених завдань, розміру території, що вивчається, необхідного рівня точності, а також від особливостей використовуваного сенсорного оснащення.

Крім того, встановлено, що безпілотні літальні апарати виконують важливу функцію у сфері екологічного моніторингу. Вони уможливлюють

спостереження за станом атмосферного повітря, водних об'єктів, лісових масивів та інших природних елементів. Їхнє використання дозволяє швидко реагувати на виникнення екологічних загроз, оцінювати наслідки природних або техногенних подій і підвищувати дієвість природоохоронних заходів.

Отже, безпілотні літальні апарати є перспективним засобом для сучасного просторового планування, містобудування та моніторингу довкілля. Їхнє застосування забезпечує поліпшення якості управління територіями, раціональне використання природних багатств і сприяє реалізації засад сталого розвитку територіальних громад.

РОЗДІЛ 2

МЕХАНІЗМ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРОБЛЕМНО-АНАЛІТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА

2.1 Аналіз сучасного стану використання БПЛА у плануванні територій

Сучасний стан використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у плануванні територій характеризується активною інтеграцією дронів у геоінформаційне моделювання, просторовий аналіз та містобудівну практику [1]. На нинішньому етапі розвитку геодезії та землеустрою БПЛА переросли статус експериментальних засобів і стали найважливішим інструментом оперативного збору великих масивів просторових даних, які безпосередньо використовуються для розроблення детальних планів територій, оновлення картографічної основи, формування комплексних планів просторового розвитку територіальних громад та прийняття стратегічних управлінських рішень [2].

У багатьох країнах світу, включаючи Україну, чітко спостерігається стійка тенденція до заміни або суттєвого доповнення класичних методів літакової аерозйомки та традиційної наземної тахеометрії більш доступними, гнучкими та оперативними безпілотними технологіями [5]. Однією з головних причин цього є економічна та часова ефективність: підготовка літака цивільної авіації для зйомки окремого району вимагає значних фінансових витрат та тривалих погоджень, тоді як запуск БПЛА може бути здійснений безпосередньо у день виїзду на об'єкт за умови сприятливих погодних умов. Одним із ключових напрямів застосування БПЛА у просторовому плануванні є створення актуальних топографічних матеріалів високої роздільної здатності. Високоточна аерофотозйомка з використанням дронів дозволяє отримувати деталізовані ортофотоплани з просторовою роздільною здатністю до кількох сантиметрів на піксель, а також цифрові моделі рельєфу та цифрові моделі

місцевості. Ці матриці висот виступають технологічним базисом для розроблення генеральних планів населених пунктів і комплексних схем планування територій громад [6]. Це забезпечує значне підвищення точності просторових даних у порівнянні з традиційними великомасштабними методами зйомки чи застарілими космічними знімками, які часто мають дефекти через хмарність або недостатню деталізацію [10].

Важливою особливістю сучасного використання БПЛА є їхня глибока інтеграція з геоінформаційними системами (ГІС) та технологіями фотограмметрії [10]. Отримані під час аерозйомки сирі зображення проходять автоматизовану обробку у спеціалізованому програмному забезпеченні (наприклад, Pix4Dmapper, Agisoft Metashape, ArcGIS Drone2Map), де на основі алгоритмів *Structure-from-Motion* створюються щільні хмари точок. Надалі ці дані імпортуються в ГІС-платформи (ArcGIS, QGIS) для створення просторових баз даних, цифрових карт, 3D-моделей і тематичних аналітичних шарів інформації [4]. Це дозволяє архітекторам та землевпорядникам здійснювати комплексний просторовий аналіз міських територій, включаючи точну оцінку щільності забудови, транспортної доступності, інфраструктурного забезпечення та функціонального зонування. У сучасному містобудуванні БПЛА активно застосовуються для моніторингу динамічних змін у використанні земель [9; 13]. Регулярна аерозйомка (моніторинг) дозволяє оперативно відстежувати хід виконання будівельних робіт, виявляти факти порушення земельного законодавства, такі як самовільне захоплення ділянок, несанкційоновані будівельні роботи у санітарно-захисних або охоронних зонах, а також жорстко контролювати дотримання положень генеральних планів [11]. Це особливо актуально для швидко зростаючих міських агломерацій та приміських зон, де просторові зміни відбуваються дуже динамічно, і класичні методи оновлення карт не встигають за реальними темпами урбанізації [11; 14].

Окремим вагомим напрямом є використання БПЛА для інвентаризації земельних ресурсів та ведення державного земельного кадастру. Дрони забезпечують швидке отримання актуальної інформації про фактичний стан

земельних ділянок, їхні реальні межі, склад угідь та характер заростання сільськогосподарських земель [6; 18]. Це безпосередньо сприяє підвищенню ефективності ведення Державного земельного кадастру України, наповненню баз даних точними просторовими об'єктами та мінімізації геодезичних помилок, зокрема накладань меж ділянок (кадастрових помилок), які виникли внаслідок використання старих систем координат або неякісної наземної зйомки минулих років [18].

У плануванні територій все більшого значення набуває створення реалістичних тривимірних моделей міського середовища — так званих "цифрових двійників" (Digital Twins). БПЛА, оснащені камерами для косої (облікгової) зйомки або лідарними сенсорами (LiDAR), дозволяють формувати високоточні цифрові 3D-моделі забудови. Вони використовуються для складного містобудівного аналізу: моделювання зон інсоляції та затінення від проєктованих споруд, планування висотної забудови з урахуванням збереження історичних панорам міста, аналізу видимості та візуального сприйняття нових об'єктів, прогнозування та моделювання гідрологічних ризиків (підтоплень) або поширення шумів у міському середовищі [3; 16]. Такі просторові моделі значно підвищують якість просторового планування та візуалізації складних проєктних рішень під час громадських слухань, роблячи містобудівну документацію зрозумілою для широкого загалу [16]. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє оперативно створювати точні карти, хмари точок та аналітичні продукти без значних ручних витрат часу [7]. Це робить весь процес планування територій більш ефективним, відкритим, прозорим і менш затратним для бюджетів територіальних громад [5].

В Україні використання БПЛА у сфері містобудування та планування територій активно розвивається, проте все ще перебуває на етапі інституційного, технологічного та нормативного становлення [13; 15]. Основними проблемами залишаються недостатня нормативно-правова база, яка б чітко регламентувала юридичний статус просторових даних, отриманих з

дрон-зйомки, обмежена інтеграція нових просторових даних у державні кадастрові системи та гостра потреба у підготовці сертифікованих фахівців, які поєднують навички пілотування, фотограмметрії та знання земельного права. Водночас спостерігається стрімке зростання кількості реалізованих проєктів, де дрони використовуються для геодезичних робіт та містобудівного аналізу територіальних громад, особливо в межах розробки комплексних планів [9; 18]. Важливим фактором розвитку є підвищення доступності самих БПЛА та програмних комплексів для фотограмметричної обробки даних [5; 10]. Це сприяє поширенню технологій серед органів місцевого самоврядування, комунальних підприємств, проєктних інститутів та приватних землевпорядних компаній [4; 20]. У результаті в Україні формується новий підхід до планування територій, який базується на точних, оперативних та верифікованих просторових даних [1; 14]. Подальший розвиток цього напрямку безпосередньо пов'язаний із загальною цифровізацією містобудівного кадастру на державному та місцевому рівнях, впровадженням алгоритмів штучного інтелекту для автоматичного дешифрування знімків та розвитком автоматизованих систем аналізу просторової інформації [7; 16].

2.2 Проблеми та обмеження застосування БПЛА

Незважаючи на стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та їх активне впровадження у сферу містобудування, планування територій і екологічного моніторингу, їх практичне використання супроводжується суттєвими проблемами, які обмежують повноцінне застосування цих технологій у повсякденній виробничій діяльності [13]. Дані обмеження мають комплексний характер і охоплюють технічні, організаційні, правові, економічні та безпекові аспекти, які тісно взаємопов'язані між собою

[15]. Без вирішення цих суперечностей використання БПЛА часто залишається фрагментарним або потребує надлишкових витрат для страхування ризиків.

Однією з базових технічних проблем є обмежений час автономної роботи БПЛА, який безпосередньо залежить від ємності акумуляторів, маси корисного навантаження (камер, мультиспектральних сенсорів, лідарів) та поточних гідрометеорологічних умов експлуатації [18]. У більшості комерційних моделей квадрокоптерного типу тривалість польоту становить від 30 до 45 хвилин на одному комплекті батарей. Для великих за площею об'єктів просторового планування (наприклад, територій громад або лісових масивів) цього часу замало, що ускладнює суцільне обстеження за один польотний цикл. Це викликає необхідність поділу об'єкта на окремі сектори, розробки багатьох маршрутів, частих злітно-посадкових операцій для заміни акумуляторів, що суттєво збільшує загальний час виконання польових робіт та зношуваність техніки [20]. БПЛА літакового (крилатого) типу мають більшу автономність (до 2–3 годин), проте вони вимагають значно більших майданчиків для зльоту та посадки, що обмежує їх використання в умовах щільної міської забудови чи пересіченої місцевості. Додатковим технічним обмеженням є жорстка залежність БПЛА від погодних умов і природних факторів [18]. Сильний поривчастий вітер (понад 10–12 м/с) не лише збільшує швидкість розряду батареї через потребу постійної стабілізації апарата, а й викликає «змазування» знімків (шевеленку), що робить їх непридатними для фотограмметричної обробки. Атмосферні опади (дощ, сніг), туман або низька хмарність можуть повністю унеможливити проведення аерозйомки або суттєво знизити її фінальну якість. Окремою технічною проблемою є обмеження точності даних у складних умовах природного рельєфу (густа рослинність, лісові масиви) та щільної міської забудови. Рослинний покрив закриває реальну поверхню землі, через що оптична камера фіксує лише крони дерев, викривляючи цифрову модель рельєфу (для вирішення цього потрібні дорогі лазерні сканери). У міських же середовищах виникають фізичні перешкоди для проходження GPS/GNSS-сигналу, ефект багатошляховості (відбиття сигналів від скляних та

бетонних стін будівель), а також виникають геометричні «сліпі зони» у вузьких вулицях, що значно ускладнює побудову коректних 3D-моделей. Це потребує обов'язкового застосування великої кількості додаткових наземних опорних точок (опізнаків) та використання складніших алгоритмів фотограмметричної обробки [14].

Серед важливих проблем також слід виділити обмеження дальності польоту та стійкості радіозв'язку між пультом оператора і БПЛА. У міських умовах присутня величезна кількість джерел електромагнітних завад (Wi-Fi мережі, високовольтні лінії електропередач, вишки мобільного зв'язку), що підвищує ризик втрати телеметрії або відеосигналу та може призвести до аварії повітряного судна [18]. Суттєвим викликом є складність обробки великих обсягів «сирих» даних. Сучасна аерофотозйомка високої роздільної здатності генерує тисячі "важких" зображень у форматі RAW або TIFF. Їх обробка вимагає наявності надпотужних робочих станцій із сучасними графічними процесорами, значних обсягів сховищ даних та ліцензійного програмного забезпечення, вартість якого часто перевищує вартість самого дрона, що суттєво уповільнює процес камеральних робіт у містобудівній практиці [20].

Організаційні проблеми пов'язані з гострою необхідністю наявності висококваліфікованих фахівців (інженерів-геодезистів, ГІС-аналітиків), які одночасно володіють глибокими знаннями у сфері геодезії, фотограмметрії та правилах експлуатації повітряних суден. Недостатній рівень підготовки операторів може призводити до грубих помилок у плануванні висоти польоту, коефіцієнтів поздовжнього та поперечного перекриття знімків, а також до неправильного налаштування фокусної відстані камери, що робить весь зібраний матеріал бракованим [15]. Крім того, динамічний розвиток безпілотних технологій вимагає постійного перенавчання кадрів, що є додатковим фінансовим тягарем для підприємств. Правові обмеження є одним із найбільш значущих факторів, що стримують масове використання БПЛА у цивільних цілях [11]. У більшості країн застосування дронів регулюється суворим авіаційним законодавством, яке встановлює чіткі вимоги до

сертифікації та реєстрації апаратів, обов'язкового отримання дозволів на використання повітряного простору від органів цивільної авіації, дотримання висотних обмежень та повну заборону польотів у спеціальних зонах (No-Fly Zones), таких як райони аеропортів, військових частин чи державних установ. У міських районах додатково діють жорсткі правила, пов'язані з безпекою третіх осіб на землі та захистом приватної власності від несанкціонованої зйомки [4].

В умовах України слід окремо враховувати критичний вплив воєнного стану на використання БПЛА. Наразі будь-яке цивільне використання дронів у повітряному просторі країни повністю заборонене або жорстко обмежене та регулюється спеціальними тимчасовими правилами і дозволами військових органів, Служби безпеки України та Генерального штабу ЗСУ [23]. Виконання аерофотозйомки для цивільних потреб (землеустрій, містобудування) можливе лише після тривалого, багатоетапного погодження з військовими адміністраціями, отримання спеціальних дозволів на польоти та чіткого звітування про координати та час зйомки. Це практично унеможливляє оперативне комерційне чи академічне використання БПЛА, особливо у прикордонних, прифронтових регіонах та великих містах, де діють засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ), які здатні підміняти GPS-координати (GPS-spoofing) або примусово садити цивільні апарати, створюючи ризик повної втрати коштовного геодезичного обладнання. Окрему групу становлять інформаційні ризики, безпосередньо пов'язані із захистом даних та конфіденційністю [9]. Під час планової аерозйомки міських кварталів у об'єктив високоточної камери неминуче потрапляють приватні об'єкти, обличчя людей, автомобільні номери, а також об'єкти критичної інфраструктури (електропідстанції, газорозподільчі вузли тощо). Це вимагає суворого дотримання законодавства про захист персональних даних та державну таємницю [15]. Недостатній рівень кіберзахисту польотних контролерів, хмарних сховищ або серверів фотограмметричної обробки може призвести до витоку геопросторових даних, що в умовах воєнного стану становить пряму загрозу національній безпеці.

Економічні обмеження також відіграють вагому роль [20]. Попри те, що споживчі дрони аматорського класу стали доступними, професійні геодезичні безпілотні авіаційні системи, що оснащені двочастотними GNSS-платами з підтримкою технологій RTK/PPK, інтегрованими геодезичними камерами та лідарами, коштують тисячі доларів [18]. До цього додається вартість базових станцій, замінних компонентів, страхування та сертифікованого навчання персоналу. Такі капіталовкладення є непідйомними для багатьох невеликих сільських територіальних громад чи регіональних проєктних організацій, що змушує їх замовляти послуги у сторонніх підрядників або повертатися до застарілих наземних методів [20]. Ще також існує проблема технічної сумісності: різні типи БПЛА та програмного забезпечення формують вихідні дані у різних закритих форматах, що ускладнює їх інтеграцію в єдині муніципальні геоінформаційні системи без втрати якості чи метаданих [7]. Відсутність уніфікованих національних стандартів та інструкцій щодо обробки, верифікації та зберігання безпілотних геопросторових даних суттєво знижує юридичну силу таких матеріалів при вирішенні земельних спорів у судовому порядку.

2.3 Порівняльний аналіз традиційних методів і БПЛА

У сучасному містобудуванні формування, оновлення та аналіз геопросторових даних є ключовою складовою ефективного управління територіями, планування забудови та розвитку інфраструктури. Якість прийнятих містобудівних рішень безпосередньо залежить від точності, актуальності та повноти вихідної просторової інформації. У зв'язку з цим особливого значення набуває вибір методів отримання геоданих, серед яких традиційні геодезичні технології поступово доповнюються або частково заміщуються безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Водночас повна

заміна традиційних методів наразі є технологічно недоцільною та нормативно неможливою, що зумовлює необхідність їхнього глибокого порівняльного аналізу [1].

Традиційні методи геодезичних вимірювань базуються на використанні наземних приладів, таких як електронні тахеометри, цифрові нівеліри та супутникові GNSS-приймачі. Вони забезпечують найвищу, еталонну точність визначення координат та висот об'єктів (на рівні кількох міліметрів або сантиметрів) і залишаються нормативно закріпленими у сфері землеустрою, державного кадастру та інженерно-геодезичних вишукувань під будівництво. Зокрема, супутникові технології дозволяють миттєво отримувати точні координати меж ділянок у державній системі координат (наприклад, УСК-2000 в Україні), а тахеометричні вимірювання є незамінними при детальному зніманні підземних та наземних інженерних мереж, фасадів будівель та визначенні меж об'єктів із чіткою геометрією [2]. Однак традиційні методи мають низку суттєвих обмежень, які гальмують темпи просторового планування великих територій. Насамперед це колосальна трудомісткість виконання робіт: кожен вимір (пікет) потребує безпосередньої присутності геодезиста або віхи з приймачем на місцевості. При обстеженні великих територій (сотні гектарів) або щільної міської забудови з інтенсивним рухом це призводить до значних часових витрат та потреби у залученні великих бригад фахівців. Крім того, ефективність таких методів зводиться до мінімуму у випадках складного рельєфу (яри, круті схили), важкодоступних або закритих зон (болота, промислові зони з обмеженим доступом) та небезпечних умов виконання робіт, наприклад поблизу швидкісних транспортних магістралей, ліній залізниці чи аварійних будівельних майданчиків [4]. Додатковим концептуальним недоліком традиційних методів є дискретний (точковий) характер отримуваних даних. Геодезичні вимірювання формують масив окремих точок із відомими координатами, між якими інженер у камеральних умовах змушений виконувати інтерполяцію (математичне наближення) для побудови горизонталей та створення цифрової моделі рельєфу. При цьому

дрібні елементи рельєфу або об'єкти місцевості, що опинилися між пікетами, просто випадають із поля зору, що обмежує можливості детального аналізу міського середовища, особливо у випадках складної історичної забудови, ландшафтного проектування або розрахунку обсягів земляних робіт [3].

На противагу цьому, технології БПЛА базуються на принципі отримання суцільних просторових даних з надвисокою щільністю. Замість окремих точок результатом аерофотозйомки та наступної фотограмметричної обробки є безперервне покриття території: ортофотоплани, детальні текстуровані 3D-моделі та щільні хмари точок (де на один квадратний метр може припадати від десятків до сотень вимірів). Це дозволяє кардинально підвищити інформативність даних, фіксуючи реальний стан кожного квадратного сантиметра території, що є надзвичайно цінним для містобудівного аналізу та архітектурного проектування [3]. Однією з головних переваг БПЛА є суттєве скорочення часу виконання польових робіт (у 5–10 разів). У той час як традиційній геодезичній бригаді для тахеометричної зйомки ділянки площею 50 га знадобиться кілька днів або тижнів інтенсивної роботи на місцевості, сучасний геодезичний квадрокоптер здатний відзняти цю площу за один політ тривалістю 30 хвилин. Це особливо важливо для оперативного оновлення картографічних матеріалів, коли рішення про виділення земельної ділянки або зміну зонування має бути прийняте у стислі терміни [1]. БПЛА забезпечують можливість безпечного збору даних у важкодоступних зонах: дрон фіксує геометрію об'єкта з повітря, усуваючи ризики для життя та здоров'я інженерів-геодезистів [4]. Разом із тим використання БПЛА має свої обмеження. Основним фактором залишається жорстка залежність від погодних умов, оскільки оптика камер вимагає якісного, рівномірного освітлення без глибоких тіней, а конструкція апаратів не захищена від прямого впливу вологи. Крім того, час, заощаджений на польовому етапі, часто переноситься на етап камеральний: фотограмметрична постобробка, вирівнювання знімків, побудова та тріангуляція моделей, фільтрація хмари точок від рослинності та сміття є

тривалим обчислювальним процесом, який потребує високої кваліфікації фахівця-фотограмметриста [1; 2].

Традиційні ж методи у цьому контексті є простішими: дані з тахеометра або GNSS-контролера скидаються у форматі координат і відразу готові для побудови лінійних планів у програмах Digitala або AutoCAD. З точки зору нормативно-правового забезпечення, наземна геодезія є повністю легітимною, тоді як результати безпілотної зйомки в Україні часто потребують додаткового підтвердження наземними вимірюваннями (контрольними точками), щоб отримати юридичну силу для внесення змін до Державного земельного кадастру [2]. Для порівняння є також питання масштабованості та економічної доцільності. У традиційній геодезії збільшення площі досліджуваної території прямо пропорційно збільшує обсяг робіт, кількість виїздів та тривалість польового етапу. Натомість використання БПЛА дозволяє охоплювати значні території за один або кілька польотів, що робить технологію значно більш продуктивною при роботі з великими площами міської забудови або при розробці схем планування територій цілих адміністративних районів [3]. БПЛА забезпечують можливість моніторингу з високою періодичністю, аж до щотижневих зйомок, що дозволяє фіксувати динаміку змін у міському середовищі [1]. Хоча впровадження БПЛА потребує великих початкових інвестицій у обладнання та софт, у довгостроковій перспективі собівартість отримання геопросторових даних на один гектар площі стає значно нижчою порівняно з традиційними наземними методами за рахунок економії людино-годин та логістичних витрат [2; 24]. У сучасній практиці містобудування все частіше застосовується комбінований (інтегрований) підхід. У такій гібридній системі БПЛА використовуються як основний засіб для оперативного збору великих обсягів просторових даних, створення ортофотопланів та первинних моделей цифрової місцевості, тоді як наземні геодезичні методи (GNSS в режимі RTK або тахеометрія) застосовуються для координування наземних опорних точок, перевірки точності моделі у критичних вузлах та зйомки об'єктів, схованих під густою рослинністю чи у тінях висотних будівель [4].

Такий підхід поєднує швидкість та масштабність БПЛА з нормативною точністю та юридичною значущістю традиційних методів, формуючи інтегровану систему збору та обробки геопросторової інформації, яка повністю відповідає сучасним вимогам містобудівного планування.

2.4 Узагальнення результатів аналізу використання БПЛА у плануванні територій

Узагальнення результатів дослідження застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у плануванні територій дозволяє сформувати системне, цілісне уявлення про їхню роль у сучасному містобудуванні та визначити ключові напрями трансформації методів отримання геопросторової інформації. Аналіз сучасної практики показує, що БПЛА остаточно перейшли із категорії екзотичного чи суто допоміжного інструмента до статусу одного з провідних засобів просторового моніторингу та інформаційного наповнення містобудівного кадастру, що істотно переформатовує структуру і темпи організації містобудівних процесів [1]. Одним із найбільш суттєвих результатів аналізу є підтвердження того, що БПЛА забезпечують якісно новий рівень оперативності отримання просторових даних. Традиційний ланцюжок збору інформації (польові вимірювання, ручне ведення абрисів, камеральне викреслювання) замінюється на напівавтоматичний цикл: автоматизований політ за заданою сіткою маршруту — фотограмметричний прорахунок — експорт готового ГІС-шару [2]. Поряд з оперативністю, технології забезпечують надвисоку щільність та інформаційну насиченість даних. Замість абстрактних векторних ліній архітектори та землевпорядники отримують точні матриці висот та фотореалістичні текстури, що дозволяє детально аналізувати морфологію забудови, оцінювати реальний стан дорожнього покриття, ступінь зношеності покрівель будівель, межі зелених насаджень та характер

використання прибудинкових територій без додаткових виїздів на об'єкт [3]. БПЛА усувають проблему швидкого старіння картографічних матеріалів, дозволяючи проводити регулярний моніторинг територій з високою періодичністю [1].

Важливим теоретичним та практичним результатом узагальнення є встановлення того, що БПЛА суттєво змінюють саму парадигму просторового аналізу в містобудуванні. Відбувається перехід від плоского (2D) дискретного проектування до суцільного об'ємного (3D) моделювання міського середовища. Це дозволяє аналізувати місто як цілісну тривимірну екосистему: розраховувати взаємний вплив будівель, моделювати вітрові потоки між висотними спорудами, прораховувати оптимальне розміщення сонячних панелей на дахах будинків на основі аналізу інсоляції та ефективно планувати розвиток підземних і наземних комунікацій [3]. Водночас результати дослідження чітко окреслюють межі застосування цієї технології, обумовлені технічними та зовнішніми чинниками: сезонність використання технології (значне зниження ефективності в зимовий період та під час затяжних осінньо-весняних опадів) [2], утворення «мертвих зон» через щільну висотну забудову та перекриття елементів рельєфу густою рослинністю, що викривляє класичні фотограмметричні моделі без використання додаткових методів фільтрації чи лазерного сканування [4], зміщення основних часових та трудових витрат з польового етапу на етап камеральної обробки, потреба у великих обчислювальних потужностях та дорогому ПЗ [3], в умовах України ключовим стримуючим фактором є режим воєнного стану, який накладає жорсткі обмеження на використання цивільного повітряного простору та вимагає специфічних процедур військового погодження для кожного польоту, що нівелює фактор миттєвої оперативності технології [1; 23]. Попри всі обмеження, загальний вектор розвитку галузі безальтернативно вказує на те, що найбільш раціональною та ефективною виробничою моделлю є інтегрований підхід, який раціонально поєднує оперативність і масштабність БПЛА з точністю та юридичною надійністю наземних методів [2; 4]. БПЛА у цій схемі

беруть на себе функцію швидкого збору масових даних на великих площах, а традиційні методи виступають інструментом верифікації, калібрування та точкового доопрацювання геометричних параметрів об'єктів.

Ключовим трендом є злиття БПЛА-технологій із алгоритмами штучного інтелекту (*AI*) та машинного навчання (*Machine Learning*). Це дозволяє автоматизувати рутинні процеси камеральної обробки: штучний інтелект здатний самостійно розпізнавати та класифікувати об'єкти на ортофотоплані (автоматично виділяти межі будівель, доріг, типів рослинності, ліній електропередач), а також виявляти розбіжності між юридичними межами ділянок у базі даних та їх фактичним використанням, зафіксованим на знімку [7]. У поєднанні з муніципальними ГІС це формує фундамент для реалізації концепції «розумного міста» (*Smart City*) та розвитку повноцінних цифрових двійників міст (*Digital Twins*), де дані з БПЛА слугують інструментом постійного, циклічного оновлення просторової інформації в режимі часу, близькому до реального, забезпечуючи сталий та збалансований розвиток територій громад [1; 3; 16].

Висновки до розділу 2

У другому розділі роботи досліджено сучасну практику залучення безпілотних літальних апаратів до завдань просторового планування, окреслено головні труднощі, що виникають при їхньому використанні, а також здійснено зіставний аналіз зі звичайними геодезичними способами.

Проведене вивчення засвідчило: БПЛА являють собою дієвий засіб для отримання своєчасної геопросторової інформації, побудови ортофотопланів, створення цифрових моделей рельєфу та тривимірних зображень місцевості. Їхнє застосування дає змогу пришвидшити виконання робіт, підвищити якісні характеристики просторових даних і забезпечити регулярність відстеження

стану територій. Разом із тим виявлено, що експлуатація безпілотників пов'язана з певними обмеженнями: чутливістю до погодних умов, обмеженою тривалістю польоту, потребою в спеціалізованому устаткуванні та програмному забезпеченні, а також законодавчими бар'єрами щодо використання повітряного простору.

Порівняльна оцінка показала, що класичні геодезичні методи гарантують високий ступінь точності вимірювань, тоді як безпілотні літальні апарати вирізняються значно більшою швидкістю та продуктивністю виконання польових і камеральних операцій. З огляду на це найраціональнішим визнано комплексний підхід, який поєднує сильні сторони безпілотних технологій і традиційних геодезичних досліджень. У підсумку зроблено висновок, що БПЛА є перспективним інструментом просторового планування й розвитку територій, а їхнє подальше впровадження сприятиме зростанню результативності містобудівної діяльності та вдосконаленню механізмів управління територіальними ресурсами.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ’ЄКТІВ ПЛАНУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БПЛА

3.1 Технологічні особливості використання БПЛА у проєктах розвитку та планування територій

Важливим напрямом використання безпілотних літальних апаратів у плануванні територій є забезпечення інформаційної підтримки під час розроблення генеральних планів населених пунктів. Генеральний план є основним видом містобудівної документації на місцевому рівні та визначає довгострокову стратегію розвитку території. Для його розроблення необхідні актуальні дані про існуючу забудову, інженерну інфраструктуру, природні умови та земельні ресурси. БПЛА дозволяють отримати таку інформацію в короткі строки та з високим рівнем деталізації, що значно підвищує якість вихідних даних для проєктування. Особливо цінними результати аерофотозйомки є для населених пунктів, у яких містобудівна документація тривалий час не оновлювалася. У багатьох громадах фактичний стан забудови суттєво відрізняється від даних, відображених у чинних планувальних документах. Завдяки використанню БПЛА можна оперативно отримати актуальну інформацію про існуючі будівлі та споруди, транспортну інфраструктуру, об’єкти соціального призначення та інженерні мережі [4]. Застосування БПЛА сприяє також підвищенню ефективності функціонального зонування територій. На основі високоточних ортофотопланів фахівці можуть визначати фактичне використання земельних ділянок, оцінювати відповідність існуючої забудови містобудівній документації та виявляти території, які мають потенціал для подальшого розвитку. Це дозволяє формувати більш обґрунтовані рішення щодо розміщення житлової, громадської, виробничої та рекреаційної забудови [8].

Однією з актуальних проблем сучасного містобудування є контроль за дотриманням вимог щодо використання земельних ресурсів. У процесі розвитку населених пунктів нерідко виникають випадки самовільного будівництва, зміни цільового призначення земель або порушення встановлених обмежень забудови. Регулярний моніторинг територій за допомогою БПЛА дозволяє своєчасно виявляти такі порушення та забезпечувати належний контроль за використанням земель [8]. Значний потенціал безпілотних технологій спостерігається під час планування розвитку транспортної інфраструктури. Для прийняття ефективних проєктних рішень необхідно враховувати існуючу дорожню мережу, інтенсивність транспортних потоків, особливості рельєфу та характер забудови. Дані аерофотозйомки забезпечують комплексне уявлення про територію та дозволяють виконувати просторовий аналіз транспортної системи. Це сприяє оптимізації маршрутів громадського транспорту, визначенню місць будівництва нових доріг та реконструкції існуючих транспортних вузлів [9]. Особливо важливим є використання БПЛА під час планування інженерної інфраструктури. Отримані просторові дані дозволяють аналізувати розташування існуючих інженерних мереж, оцінювати можливості їх модернізації та визначати оптимальні напрями подальшого розвитку. Це має важливе значення для планування систем водопостачання, водовідведення, електропостачання та газопостачання [9]. Окрему роль БПЛА відіграють у розвитку концепції сталого розвитку територій. Сучасне містобудування передбачає збалансоване поєднання економічних, соціальних та екологічних інтересів. Для досягнення цієї мети необхідне постійне спостереження за станом навколишнього середовища та використанням природних ресурсів. Безпілотні літальні апарати забезпечують можливість оперативного отримання інформації про стан зелених зон, водних об'єктів та інших природних компонентів міського середовища [15].

Важливим напрямом є застосування БПЛА для оцінки ризиків природного та техногенного характеру. У процесі територіального планування необхідно враховувати можливість виникнення підтоплень, зсувів, ерозійних

процесів та інших небезпечних явищ. Дані дистанційного зондування Землі, отримані за допомогою безпілотних систем, дозволяють виявляти потенційно небезпечні ділянки та враховувати ці фактори під час розроблення містобудівної документації [16]. Не менш важливим є використання БПЛА під час реалізації проєктів реконструкції історичних частин міст. Історичне середовище потребує особливої уваги через необхідність збереження культурної спадщини та архітектурної цінності забудови. Використання аерофотознімання дозволяє створювати детальні тривимірні моделі пам'яток архітектури та історичних кварталів, що сприяє їх дослідженню, збереженню та реставрації [7]. У сучасній практиці територіального планування все більшого поширення набуває використання технологій тривимірного моделювання. Дані БПЛА дозволяють створювати високоточні 3D-моделі територій, які можуть використовуватися для візуалізації майбутніх проєктів забудови. Це забезпечує можливість оцінки впливу нових об'єктів на існуюче міське середовище та дозволяє більш ефективно проводити громадські обговорення містобудівних рішень [3].

Суттєвою перевагою використання БПЛА є можливість проведення повторних спостережень через короткі проміжки часу. Завдяки цьому формується динамічна база просторових даних, яка відображає зміни території у процесі її розвитку. Такі дані можуть використовуватися для оцінки ефективності реалізації містобудівних програм, аналізу темпів забудови та прогнозування подальших тенденцій розвитку населених пунктів [17]. Перспективним напрямом є інтеграція результатів аерофотозйомки у системи підтримки прийняття управлінських рішень. Використання сучасних геоінформаційних платформ дозволяє поєднувати дані БПЛА з інформацією кадастру, статистичними показниками та матеріалами містобудівної документації. У результаті створюється єдиний інформаційний простір, який забезпечує комплексний аналіз територій та підвищує ефективність управління їх розвитком [18]. Специфіка розроблення детальних планів територій за допомогою безпілотних комплексів полягає у можливості значного

масштабування робочих креслень без втрати якості картографічної основи. На етапі формування ескізних намірів забудови інженер-проектувальник отримує не просто статичну підкладку, а динамічну метричну модель простору. Це дає змогу з високою точністю проектувати червоні лінії вулиць, розраховувати радіуси розвороту транспортних засобів на складних перехрестях та формувати оптимальні профілі поперечних розрізів вулично-дорожньої мережі. Використання ортофотопланів надвисокої роздільної здатності мінімізує похибки при проектуванні санітарно-захисних зон навколо промислових об'єктів та охоронних зон уздовж магістральних трубопроводів чи ліній електропередач [5].

Окрему увагу в сучасній містобудівній практиці приділяють ревіталізації занедбаних промислових зон (браунфілдів). Традиційні методи зйомки таких об'єктів часто ускладнені через аварійний стан будівель, захаращеність території та обмежений доступ до окремих ділянок. БПЛА забезпечують дистанційний та безпечний збір даних про геометричні параметри зруйнованих цехів, місця накопичення промислових відходів та стан під'їзних залізничних колій. Отримані аналітичні матеріали стають основою для розроблення інвестиційних паспортів територій, оптимізації демонтажних робіт та проектування нових багатофункціональних комплексів [3]. У контексті сучасних реалій України, застосування БПЛА у просторовому плануванні отримало новий вектор розвитку, пов'язаний із фіксацією руйнувань та плануванням відновлення територій, що постраждали внаслідок бойових дій. Створення високоточних цифрових ортофотопланів громад дозволяє здійснювати первинну оцінку масштабів пошкоджень житлового та інфраструктурного фонду без ризику для життя геодезистів на нерозмінованих ділянках. На основі цих даних розробляються Програми комплексного відновлення областей, територій територіальних громад (або їх частин), що є новим видом документації із просторового планування в Україні. Надвисока просторова роздільна здатність матеріалів зйомки з БПЛА дає змогу архітекторам та землепорядникам чітко розмежувати об'єкти, які підлягають

капітальному ремонту, від тих, що потребують повного демонтажу та нового будівництва [11]. Таким чином, результати аналізу свідчать про те, що БПЛА стали важливим інструментом сучасного територіального планування. Їх використання дозволяє забезпечити високий рівень актуальності просторових даних, підвищити якість містобудівних рішень та сприяти впровадженню сучасних цифрових технологій у практику управління територіями. Подальший розвиток безпілотних технологій створює нові можливості для підвищення ефективності проєктів розвитку територій та забезпечення сталого розвитку населених пунктів [15].

3.2 Методика геопросторового аналізу та моніторингу територіальних ресурсів

У сучасних умовах розвитку геоінформаційних технологій та цифровізації управління територіями геопросторовий аналіз набуває ключового значення як інструмент обґрунтування містобудівних та землепорядних рішень. Його ефективність безпосередньо залежить від якості, актуальності та деталізації вихідних даних. У цьому контексті безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали одним із найважливіших джерел оперативного отримання просторової інформації, що суттєво змінило підходи до моніторингу та аналізу територій [1]. На відміну від традиційних методів збирання геопросторових даних, які базуються на наземних вимірюваннях і потребують значних часових і трудових витрат, БПЛА дозволяють отримувати суцільне покриття території з високою просторовою роздільною здатністю. Це забезпечує можливість одночасного аналізу великої кількості об'єктів і характеристик території, включаючи рельєф, забудову, транспортну інфраструктуру та природні елементи [12]. Одним із базових продуктів, які формуються на основі даних БПЛА, є ортофотоплани. Вони забезпечують геометрично коректне зображення

території, яке може використовуватися як основа для картографічних матеріалів і містобудівної документації. Завдяки високій деталізації ортофотоплани дозволяють проводити точний аналіз структури забудови, меж земельних ділянок та стану інфраструктури [17]. Важливою складовою геопросторового аналізу є створення цифрових моделей рельєфу та цифрових моделей поверхні. Ці моделі дозволяють відображати не лише природний рельєф, але й усі об'єкти, розташовані на поверхні території, включаючи будівлі та рослинність. У містобудівній практиці такі моделі використовуються для аналізу ухилів території, планування інженерних мереж, визначення зон ризику підтоплення та оцінки придатності земель для забудови [1].

Геопросторовий моніторинг, який здійснюється за допомогою БПЛА, дозволяє відстежувати динамічні зміни територій у часі. Регулярне виконання аерофотозйомки дає можливість формувати серії просторових даних, які використовуються для аналізу розвитку міських територій, змін у землекористуванні та трансформації природного середовища. Такий підхід є особливо важливим для швидкозмінних міських систем, де актуальність інформації має критичне значення [12]. Окрему роль у геопросторовому аналізі відіграє можливість інтеграції даних БПЛА з геоінформаційними системами (ГІС). Це дозволяє поєднувати аерознімки, цифрові моделі та інші просторові шари в єдиній аналітичній платформі. У результаті формується багаторівнева модель території, яка забезпечує можливість комплексного аналізу та моделювання різних сценаріїв розвитку [18]. Завдяки високій точності та деталізації даних БПЛА можуть застосовуватися для інвентаризації земельних ресурсів. У процесі такого аналізу визначаються фактичні межі використання земель, перевіряється відповідність їх цільового призначення, а також виявляються випадки самовільного зайняття земельних ділянок. Це має важливе значення для ефективного управління територіями та забезпечення дотримання земельного законодавства [13]. Крім того, БПЛА активно використовуються для моніторингу міської забудови. Отримані дані дозволяють аналізувати щільність забудови, висотність будівель,

функціональне зонування територій та відповідність фактичного стану містобудівній документації. Це забезпечує можливість оперативного контролю за розвитком міського середовища та виявлення порушень містобудівних норм [5]. У процесі геопросторового аналізу важливим є також врахування транспортної інфраструктури. Дані, отримані за допомогою БПЛА, дозволяють оцінювати стан дорожньої мережі, аналізувати транспортну доступність окремих районів та визначати проблемні ділянки, що потребують реконструкції. Це сприяє підвищенню ефективності транспортного планування [9]. Таким чином, уже на базовому рівні застосування БПЛА забезпечує суттєве розширення можливостей геопросторового аналізу за рахунок високої деталізації, оперативності та комплексності отримуваних даних. Це створює основу для подальшого використання безпілотних технологій у більш складних завданнях моніторингу та моделювання територій. Важливим напрямом застосування безпілотних літальних апаратів в геопросторовому аналізі є екологічний моніторинг територій. У сучасних умовах інтенсивної урбанізації та антропогенного навантаження на природне середовище виникає потреба у регулярному спостереженні за станом зелених насаджень, водних об'єктів та ґрунтового покриву. БПЛА забезпечують можливість отримання актуальних даних високої роздільної здатності, що дозволяє оперативно виявляти зміни у природних екосистемах [10].

Застосування мультиспектральних камер, встановлених на безпілотних платформах, дає змогу аналізувати стан рослинності на основі індексів вегетації, зокрема NDVI. Це дозволяє визначати ділянки деградації зелених насаджень, оцінювати рівень вологості рослин та виявляти зони, які зазнають негативного впливу техногенних факторів. Такий підхід є особливо актуальним для міст, де екологічний баланс є важливою складовою сталого розвитку територій [20]. Окремим напрямом є використання БПЛА для моніторингу змін землекористування. Завдяки регулярному виконанню аерофотозйомки формується динамічна база просторових даних, яка дозволяє відстежувати трансформацію територій у часі. Це включає зміну функціонального

використання земель, появу нових об'єктів забудови, а також виявлення несанкціонованих змін у структурі території. Подібний моніторинг є важливим інструментом для органів місцевого самоврядування [8]. Суттєве значення має застосування БПЛА у контролі будівельної діяльності. Під час реалізації містобудівних проєктів безпілотні системи дозволяють здійснювати регулярний моніторинг будівельних майданчиків, фіксувати етапи виконання робіт та порівнювати фактичний стан об'єктів із проєктною документацією. Це сприяє підвищенню прозорості будівельних процесів та зменшенню ризику порушення будівельних норм [5].

Важливою перевагою є можливість створення тривимірних моделей міської забудови на основі фотограмметричних даних. Такі моделі дозволяють аналізувати просторову структуру міста, оцінювати висотність забудови, щільність забудованих територій та взаємне розташування об'єктів. У містобудівній практиці 3D-моделі використовуються також для візуалізації проєктних рішень і оцінки їх впливу на існуюче середовище [1]. Окремої уваги заслуговує технологія LiDAR-сканування, яка може інтегруватися з БПЛА для отримання високоточної просторової інформації. На відміну від традиційної фотограмметрії, LiDAR дозволяє отримувати дані навіть у складних умовах, зокрема при наявності щільної рослинності або часткового перекриття об'єктів. Це значно підвищує точність цифрових моделей рельєфу та поверхні [2].

Геопросторовий моніторинг також активно використовується для аналізу транспортної інфраструктури. БПЛА дозволяють оцінювати стан дорожнього покриття, виявляти дефекти, аналізувати завантаженість транспортних вузлів та визначати проблемні ділянки дорожньої мережі. Отримані дані можуть використовуватися для планування ремонтних робіт і оптимізації транспортних потоків [9]. У сфері управління територіями важливу роль відіграє моніторинг інженерної інфраструктури. Безпілотні системи дозволяють здійснювати контроль за станом ліній електропередач, трубопроводів, дренажних систем та інших об'єктів. Це особливо важливо для великих територій, де традиційні методи обстеження є трудомісткими та затратними [22]. Значним напрямом є

також використання БПЛА у кризових ситуаціях, зокрема для оцінки наслідків надзвичайних подій. Аерофотозйомка дозволяє оперативно отримувати інформацію про масштаби пошкоджень територій, що є критично важливим для планування відновлювальних робіт. У таких випадках БПЛА виступають як інструмент швидкого реагування та первинного збору даних [11]. При проведенні моніторингу берегових ліній та гідрографічних об'єктів у межах населених пунктів БПЛА надають унікальну можливість фіксації процесів водної ерозії, замулення русел річок та руйнування гідротехнічних споруд. Використання тепловізійних сенсорів на БПЛА дозволяє здійснювати просторовий моніторинг теплових втрат магістральних теплотрас підземного закладання, а також виявляти місця несанкціонованих скидів стічних вод у відкриті водойми. Такі прикладні аспекти роблять геопросторовий аналіз комплексним інструментом екологічного та інженерного аудиту міських екосистем [19].

Особливе практичне значення для геопросторового аналізу має розрахунок індексів щільності та просторових кореляцій за допомогою інструментів ГІС на основі детальних хмар точок, отриманих з БПЛА. Наприклад, аналіз щільності забудови (Kernel Density Estimation) у поєднанні з тривимірними метриками будівель дозволяє моделювати зони затінення (інсоляції) житлових масивів та розраховувати коефіцієнти аерації міських кварталів. Крім того, автоматизоване виділення міських «островів тепла» за допомогою теплових сенсорів БПЛА дає змогу оцінити ефективність існуючого розподілу рекреаційних та зелених зон у межах населеного пункту [24]. Таким чином, геопросторовий аналіз із використанням БПЛА охоплює широкий спектр завдань — від екологічного моніторингу до контролю будівництва та аналізу інфраструктури. Це робить безпілотні технології універсальним інструментом сучасного управління територіями [22].

3.3 Техніко-економічна ефективність та перспективи впровадження безпілотних технологій у геодезичне виробництво

Сучасний етап розвитку геодезії, містобудування та територіального планування характеризується глибокою цифровою трансформацією, яка змінює підходи до збору, обробки та використання просторових даних. Одним із найбільш перспективних інструментів у цій сфері є безпілотні літальні апарати (БПЛА), що забезпечують швидке, детальне та відносно економічно доступне отримання актуальної інформації про території різного типу. Їх застосування поступово переходить від допоміжного інструмента до базового елемента систем геоінформаційного забезпечення містобудівної діяльності [1].

Перспективи розвитку технологій БПЛА безпосередньо пов'язані з подальшим удосконаленням технічних характеристик апаратів, алгоритмів обробки даних, а також рівнем інтеграції у цифрові платформи управління територіями. При цьому важливо розглядати БПЛА не ізольовано, а як частину єдиної екосистеми геоінформаційних технологій, що включає ГІС, хмарні сервіси, системи штучного інтелекту та великі масиви просторових даних. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності є удосконалення планування аерозйомочних робіт. Якість отриманих результатів безпосередньо залежить від правильного вибору параметрів польоту, зокрема висоти зйомки, швидкості руху БПЛА, кутів нахилу камери, поздовжнього та поперечного перекриття знімків, а також конфігурації маршруту. Невірне налаштування цих параметрів може призводити до появи “сліпих зон”, геометричних спотворень або недостатньої щільності хмар точок, що негативно впливає на точність кінцевих моделей. У зв'язку з цим сучасні підходи базуються на використанні автоматизованих систем планування польотів, які враховують рельєф місцевості, висотну забудову та обмеження повітряного простору [12]. Особливої уваги потребує адаптивний підхід до планування зйомки залежно від типу території. Для щільно забудованих міських районів характерним є

зменшення висоти польоту та збільшення перекриття знімків, що дозволяє підвищити деталізацію фасадів будівель та складних інженерних об'єктів. Натомість для відкритих територій, таких як сільськогосподарські угіддя, промислові зони або передмістя, параметри зйомки можуть бути оптимізовані з метою скорочення часу виконання робіт без суттєвої втрати точності. Такий диференційований підхід дозволяє досягати оптимального балансу між продуктивністю та якістю даних [17]. Наступним важливим напрямом є інтеграція високоточних супутникових технологій GNSS RTK/PPK. Використання RTK (Real Time Kinematic) забезпечує отримання координат у режимі реального часу з сантиметровою точністю, тоді як PPK (Post Processed Kinematic) дозволяє здійснювати постобробку даних із корекцією траєкторії польоту. Це значно зменшує залежність від великої кількості наземних опорних пунктів, які традиційно використовуються для геоприв'язки знімків. У результаті скорочується обсяг польових робіт, зменшуються часові витрати та підвищується оперативність виконання проєктів [2]. Крім того, зменшення кількості наземних контрольних точок має важливе значення з точки зору безпеки виконання робіт. У міських умовах встановлення таких точок часто пов'язане з перебуванням персоналу поблизу транспортних потоків, будівельних майданчиків або інженерних мереж, що підвищує рівень ризику. Використання БПЛА у поєднанні з RTK/PPK технологіями дозволяє мінімізувати ці ризики та підвищити загальну безпеку геодезичних процесів [2].

Окремим напрямом підвищення ефективності є автоматизація камеральної обробки даних. Сучасні фотограмметричні програмні комплекси дозволяють автоматично формувати ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу (ЦМР), цифрові моделі поверхні (ЦМП), а також тривимірні моделі забудови високої деталізації. Використання алгоритмів комп'юторного зору та машинного навчання дає змогу автоматично класифікувати об'єкти міської інфраструктури, включаючи будівлі, дороги, зелені насадження та інженерні споруди. Це значно скорочує час обробки даних та зменшує вплив людського фактору на результати [7]. Важливою складовою сучасного підходу є інтеграція

даних, отриманих за допомогою БПЛА, у геоінформаційні системи (ГІС). ГІС виступають центральною платформою для зберігання, аналізу та візуалізації просторової інформації. Поєднання даних БПЛА з кадастровими даними, містобудівною документацією, інженерними мережами та іншими просторовими шарами створює багаторівневу інформаційну систему, яка дозволяє здійснювати комплексний аналіз територій та моделювання сценаріїв їх розвитку [3]. У контексті цифрової трансформації міст особливого значення набуває концепція “розумного міста” (Smart City), у якій просторові дані оновлюються майже в режимі реального часу. У таких умовах БПЛА виконують функцію одного з основних джерел оперативної просторової інформації, що забезпечує постійну актуалізацію цифрових моделей міського середовища та підтримку процесів управління територіями [3].

Ще одним перспективним напрямом є використання додаткових сенсорних систем. Зокрема, LiDAR-технології дозволяють отримувати високоточні тривимірні дані навіть у складних умовах щільної забудови або часткового перекриття об'єктів рослинністю. Це особливо важливо для формування цифрових моделей рельєфу та інженерних структур [2]. Мультиспектральні та гіперспектральні камери, у свою чергу, розширюють можливості аналізу, дозволяючи оцінювати стан рослинності, рівень забруднення територій та екологічні характеристики міського середовища [20]. Важливим чинником ефективного впровадження БПЛА є рівень підготовки фахівців. Сучасний спеціаліст у сфері геодезії та містобудування повинен володіти міждисциплінарними знаннями, що охоплюють геодезію, фотограмметрію, ГІС-технології, основи програмування, аналіз великих даних та експлуатацію безпілотних систем. Недостатній рівень підготовки персоналу може суттєво знижувати якість отриманих результатів навіть за умови використання сучасного обладнання [12]. Також важливим є вдосконалення нормативно-правового регулювання у сфері використання БПЛА. Сьогодні існують обмеження щодо польотів у міських районах, вимоги до реєстрації безпілотних систем та дотримання правил безпеки повітряного простору.

Водночас відсутність уніфікованих стандартів обробки та використання просторових даних ускладнює їх інтеграцію у практику містобудування [6].

Окремо слід виділити економічну ефективність застосування БПЛА. Незважаючи на значні початкові інвестиції у придбання обладнання та програмного забезпечення, у довгостроковій перспективі використання безпілотних технологій є економічно доцільним. Це пов'язано зі скороченням часу виконання польових і камеральних робіт, зменшенням витрат на персонал, логістику та зниженням кількості помилок, які потребують повторного виконання вимірювань. Додатковою перевагою є можливість багаторазового використання отриманих просторових даних для різних аналітичних завдань [1]. Розвиток хмарних обчислень (Cloud Computing) відкриває нові обрії для камеральної обробки просторових масивів даних значних обсягів (Big Data). Замість використання локальних робочих станцій високої потужності, оператори БПЛА отримують змогу завантажувати сирі аерознімки безпосередньо у хмарні середовища. Це забезпечує паралельну обробку фотограмметричних проектів, автоматичне зшивання ортофотопланів та верифікацію точності супутникових вимірювань GNSS у напіваавтоматичному режимі. Впровадження таких інструментів дозволяє скоротити термін підготовки кінцевої продукції від кількох днів до кількох годин, що критично важливо при оперативному моніторингу [18]. Майбутній технологічний стрибок у підвищенні ефективності БПЛА пов'язаний із впровадженням алгоритмів штучного інтелекту (AI) безпосередньо «на борту» літального апарату (Edge AI). Це дозволить реалізувати функцію адаптивного сканування, коли БПЛА самостійно ідентифікує об'єкти інтересу (наприклад, межі виїмок чи дефекти ліній електропередач) і змінює щільність зйомки в процесі польоту. Крім того, розвиток технологій автоматичних базових станцій («дронів-у-коробці» — Drone-in-a-Box) дозволить повністю автоматизувати циклічний моніторинг об'єктів критичної інфраструктури та великих будівельних майданчиків без безпосередньої присутності оператора на місці виконання робіт [22]. Перспективи розвитку та підвищення ефективності застосування

БПЛА у містобудівних і планувальних роботах визначаються необхідністю комплексного підходу, який поєднує технологічні інновації, автоматизацію процесів, розвиток програмного забезпечення та підготовку висококваліфікованих фахівців. У сукупності це формує основу для переходу до сучасної моделі управління територіями.

3.4 Обґрунтування шляхів підвищення ефективності застосування БПЛА у планувальних роботах

Широкомасштабне впровадження безпілотних літальних апаратів у практику землевпорядного проєктування та територіального планування потребує детального техніко-економічного аналізу та чіткого правового врегулювання. Будь-який інженерно-геодезичний проєкт, що спирається на використання дистанційного зондування, має відповідати чинному законодавству держави та демонструвати фінансову доцільність порівняно із класичними методами тахеометричної зйомки чи супутникових GNSS-спостережень [1]. Інтеграція безпілотних технологій у виробничі процеси землевпорядних підприємств не повинна бути даниною технологічній моді; вона має виступати зваженим кроком, підкріпленим розрахунками зниження собівартості кінцевої продукції, підвищення продуктивності праці польових бригад та мінімізації логістичних витрат. Економічна ефективність використання БПЛА розраховується на основі зіставлення капітальних і операційних витрат. До капітальних витрат належать придбання безпілотного авіаційного комплексу, купівля спеціалізованого програмного забезпечення для фотограмметричної обробки даних (Pix4D, Agisoft Metashape тощо) та витрати на навчання й сертифікацію зовнішніх пілотів [12]. При детальному аналізі структури стає зрозуміло, що вартість самого планера або квадрокоптера часто становить менше половини загальних початкових інвестицій. Особливу питому

вагу у структурі одноразових витрат посідає цільове геодезичне обладнання (наприклад, двочастотні GNSS-плати з підтримкою RTK/PPK режимів, інтегровані безпосередньо «на борт») та ліцензійне програмне забезпечення. Фотограмметричні комплекси, здатні автоматично обробляти тисячі аерознімків надвисокої роздільної здатності, будувати щільні хмари точок і текстуровані 3D-моделі, потребують щорічного сертифікованого оновлення, що також капіталізується у фінансовій звітності підприємства. Крім того, обов'язковою умовою є модернізація камеральних робочих станцій. Локальні ЕОМ повинні мати високі обчислювальні потужності (багатоядерні процесори, значний обсяг оперативної пам'яті класу DDR5 та професійні графічні прискорювачі), без яких швидка обробка «важких» просторових даних стає неможливою. До операційних витрат включають технічне обслуговування апаратів, амортизацію акумуляторів, транспортні витрати та оплату праці персоналу [12]. У межах OPEX окрему увагу слід приділити літій-полімерним або літій-іонним акумуляторним батареям, які мають обмежений життєвий цикл (зазвичай від 150 до 200 циклів заряд-розряд), після чого їх ємність стрімко падає. Це вимагає закладання витрат на їх регулярне оновлення у депреціаційний фонд підприємства. Операційні витрати також коливаються залежно від географії об'єктів проектування: віддаленість територій збільшує амортизацію автотранспорту та витрати на відрядження геодезичної бригади. Проте, оптимізація польового етапу дозволяє суттєво перерозподілити фонд оплати праці, зміщуючи акцент з екстенсивної польової роботи на інтелектуальну камеральну обробку.

Головний економічний ефект досягається за рахунок скорочення часу виконання польових робіт на об'єктах великої площі. Наприклад, зйомка земельного масиву площею 500 га за допомогою класичних наземних методів може тривати від 5 до 7 робочих днів бригадою з двох геодезистів. Застосування БПЛА дозволяє виконати аерофотозйомку такої ж площі за один-два польотні підходи тривалістю до двох годин [18] (Рисунок 2.1). При цьому щільність просторових даних та рівень деталізації рельєфу є значно вищими,

що мінімізує витрати на повторні польові виїзди для усунення помилок [17]. Розрахунок чистого дисконтованого доходу та періоду окупності інвестицій показує, що за умови стабільного завантаження землевпорядного підприємства (від 15–20 великих об'єктів на рік) первинні капіталовкладення в інноваційні безпілотні комплекси повністю окупаються протягом перших 8–10 місяців експлуатації. Фінансовий успіх забезпечується не лише швидкістю, а й багатоцільовим характером отриманих матеріалів. Один ортофотоплан, створений за результатами одного польоту, може одночасно використовуватися для розроблення проєкту землеустрою щодо відведення земельної ділянки, формування обмінних файлів у форматі XML, розроблення детального плану території та проведення нормативної грошової оцінки земель.

Критерій порівняння	Традиційна тахеометрична зйомка та GNSS	Аерофотознімання з використанням БПЛА (RTK/PPK)
Склад польової бригади	2-3 інженери-геодезисти	1 пілот (оператор) + 1 геодезист (для контрольних точок)
Тривалість польового етапу	5 – 7 робочих днів (40–56 годин)	1 – 2 години польотного часу
Щільність точок на 1 м ²	Окремі пікети (1 точка на 10–50 м ²)	Від 20 до 100+ точок на 1 м ² (хмара точок)
Деталізація рельєфу та об'єктів	Середня, з генералізацією між пікетами	Надвисока, повна цифрова модель поверхні (ЦМП)
Вплив людського фактора в полі	Високий (пропуски об'єктів, помилки вех)	Мінімальний (автоматичний польотний маршрут)
Собівартість робіт (відносна)	Базова (вища за рахунок людино-годин)	Знижена на 40–60% (при систематичному використанні)

Рисунок 3.1 - Техніко-економічне зіставлення методів зйомки для об'єкта площею 500 га

Розрахунок чистого дисконтованого доходу та періоду окупності інвестицій показує, що за умови стабільного завантаження землевпорядного підприємства (від 15–20 великих об'єктів на рік) первинні капіталовкладення в інноваційні безпілотні комплекси повністю окупаються протягом перших 8–10 місяців експлуатації. Фінансовий успіх забезпечується не лише швидкістю, а й багатоцільовим характером отриманих матеріалів. Один ортофотоплан, створений за результатами одного польоту, може одночасно використовуватися для розроблення проєкту землеустрою щодо відведення земельної ділянки, формування обмінних файлів у форматі XML, розроблення детального плану території та проведення нормативної грошової оцінки земель.

Нормативно-правовий аспект використання безпілотних комплексів в Україні регулюється Повітряним кодексом України, Правилами використання повітряного простору та інструкціями Державіаслужби. Основні правові вимоги включають обов'язкову реєстрацію безпілотних суден, отримання дозволів на використання повітряного простору та дотримання параметрів висоти польоту у межах прямої видимості (VLOS) [6]. Юридична площина експлуатації БПЛА вимагає від підприємства суворого дотримання регламентів безпеки. Кожен літальний апарат, залежно від його злітної маси та призначення, повинен мати належний пакет реєстраційних документів Державіаслужби України, а оператори зобов'язані пройти навчання у сертифікованих навчальних центрах та отримати посвідчення встановленого зразка. Нехтування цими вимогами не лише ставить під загрозу безпеку цивільної авіації та наземних об'єктів, а й може призвести до визнання отриманих геопросторових даних юридично нікчемними у разі виникнення судових спорів щодо меж земельних ділянок. Окреме місце посідає правове регулювання використання результатів аерофотозйомки. Згідно із законодавством про топографо-геодезичну і картографічну діяльність, отримані ортофотоплани та цифрові моделі місцевості повинні проходити процедуру верифікації та прив'язки до Державної геодезичної референц-системи координат УСК-2000 [1]. Проведення зйомок для потреб Державного

земельного кадастру (ДЗК) та містобудівного кадастру дозволяється лише сертифікованим інженерам-геодезистам або землевпорядникам, які несуть персональну юридичну відповідальність за точність та достовірність даних [13], [14]. У межах ведення Державного земельного кадастру чинні нормативно-технічні вимоги висувають жорсткі рамки до середньоквадратичної похибки визначення координат поворотних точок меж земельних ділянок. Для населених пунктів ця величина не повинна перевищувати 0,1 метра (10 см). Досягнення такої точності виключно фотограмметричними методами без використання наземного геодезичного обґрунтування є неможливим. Тому правовий та інженерний протокол виконання робіт вимагає обов'язкового закладання на місцевості наземних контрольних та опорних точок (опознаків), координати яких визначаються високоточними GNSS-приймачами у статичному режимі або RTK від мережі базових станцій. Тільки після математичного зрівнювання фотограмметричного блоку в спеціалізованому софті за допомогою цих опорних точок сформований ортофотоплан набуває статусу офіційного юридичного документа, придатного для внесення до бази даних ДЗК. Особливим антикризовим аспектом правового регулювання є дія специфічних обмежень воєнного стану. На сьогодні виконання будь-яких цивільних аерозйомочних робіт в Україні потребує обов'язкового погодження з Генеральним штабом Збройних Сил України, Службою безпеки України та відповідними обласними військовими адміністраціями. Несанкціоновані польоти тягнуть за собою сувору кримінальну відповідальність [23]. З огляду на безпекову ситуацію, процедура отримання дозволів ускладнена та регламентована спеціальними тимчасовими інструкціями. Перед кожним вильотом землевпорядне підприємство зобов'язане подавати офіційну заявку із зазначенням точних меж польотної зони, висот та часових вікон, а також технічних характеристик апарату та персональних даних оператора. У багатьох прифронтових або стратегічно важливих регіонах запроваджено повну заборону на використання цивільного повітряного простору безпілотними системами, що змушує компанії тимчасово повертатися до класичних наземних

методів зйомки або використовувати архівні супутникові знімки надвисокої роздільної здатності. З іншого боку, з правової точки зору, використання БПЛА є обов'язковим елементом при документуванні екологічних та інфраструктурних збитків, що робить цей інструмент юридично легітимним способом збирання доказів для міжнародних судових інстанцій [11]. Безпілотники забезпечують дистанційне, швидке та всеосяжне фіксування геометричних параметрів руйнувань промислових об'єктів, житлових кварталів, гідротехнічних споруд та лісових масивів у зонах, де наземний доступ обмежений через мінну небезпеку або загрозу обвалів. Створені в результаті ортофотоплани та об'ємні моделі є ключовою доказовою базою для розрахунку вартості капітального відновлення територій та пред'явлення міжнародних юридичних претензій до країни-агресора щодо відшкодування матеріальних збитків.

Інтеграція правових норм та економічних розрахунків дозволяє сформувати чіткий алгоритм дій для підприємств, які впроваджують технології БПЛА. Це мінімізує ризики накладення штрафних санкцій за порушення правил польотів та гарантує, що створена землевпорядна чи містобудівна документація успішно пройде державну експертизу та буде внесена до відповідних державних інформаційних систем і кадастрів [18]. Системний підхід, що поєднує глибокий фінансовий менеджмент (врахування CAPEX/ОРЕХ) із неухильним виконанням вимог Повітряного кодексу та земельного законодавства, дозволяє сучасним землевпорядним організаціям виходити на новий рівень конкурентоспроможності. Техніко-економічне обґрунтування доводить, що капіталізація підприємства через купівлю безпілотних технологій є високорентабельною інвестицією, яка кардинально прискорює цифровізацію земельно-кадастрової системи України та створює надійний фундамент для повоєнного просторового планування та відновлення громад.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дипломної роботи детально проаналізовано технологічні аспекти, методичні прийоми та економічну доцільність застосування безпілотних літальних апаратів (скорочено — БПЛА) у сфері геодезії та просторового планування територій. Виконаний аналіз показав, що безпілотники нині виступають одним із провідних засобів для збирання геопросторових даних, який суттєво трансформує усталені підходи до проведення польових і камеральних робіт, забезпечуючи водночас високий рівень точності, швидкість виконання та значну деталізацію кінцевих матеріалів.

З'ясовано, що використання безпілотників у завданнях, пов'язаних із розвитком територій, дає змогу оперативно створювати достовірні ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу та цифрові моделі поверхні. Саме ці продукти стають основою для підготовки містобудівної документації — передусім генеральних планів і детальних планів окремих територій. Такий підхід помітно поліпшує якість вихідних даних для подальшого проектування, дозволяє більш аргументовано визначати функціональне призначення різних ділянок, а також забезпечує дієвий контроль за освоєнням земельних ресурсів і виявлення випадків порушення містобудівного законодавства.

Окремо варто наголосити на підтвердженій ефективності поєднання інформації, отриманої за допомогою БПЛА, із геоінформаційними системами. Таке поєднання відкриває можливості для багаторівневого просторового аналізу, відстеження змін територій у часі, а також для прогнозного моделювання різних варіантів еволюції міського середовища. Зазначений підхід набуває особливого значення в умовах швидких змін у землекористуванні, коли потрібно часто й оперативно оновлювати актуальну містобудівну інформацію.

У межах техніко-економічної оцінки доведено, що запровадження безпілотних технологій у геодезичну практику є економічно виправданим.

Незважаючи на потребу в суттєвих початкових вкладеннях, регулярне використання БПЛА дозволяє значно скоротити час на польові роботи, зменшити витрати на оплату праці персоналу та на логістику, а також звести до мінімуму необхідність повторних виїздів на об'єкт завдяки високій якості зібраних даних. У підсумку це забезпечує швидке повернення вкладених коштів і підвищення загальної продуктивності виробничих процесів.

Отже, отримані в ході дослідження результати свідчать, що безпілотні літальні апарати є надзвичайно дієвим інструментом для сучасного територіального планування та геодезичних робіт. Їх подальше розширення у практичній діяльності сприятиме прискоренню цифрової трансформації містобудівної сфери, підвищенню достовірності та інформативності просторових даних, а також удосконаленню механізмів управління розвитком територій.

ВИСНОВКИ

Підбиваючи підсумки виконаного науково-прикладного дослідження, варто зазначити, що вдалося сформулювати завершену сукупність теоретичних узагальнень і практичних порад. Ці напрацювання орієнтовані на глибоке оновлення просторово-планувальної організації, підвищення ефективності технологічних ланцюжків у містобудівному проєктуванні, а також на системну перебудову чинних інституційних механізмів землеустрою. Досягти зазначених змін пропонується через масштабне залучення та різноманітні сценарії використання безпілотних авіаційних комплексів разом із супутніми засобами дистанційного зондування Землі.

За результатами роботи констатуємо: системне застосування сучасних безпілотних авіаційних систем у сфері геодезичних досліджень є визначальним чинником та ключовою передумовою для всебічної модернізації, інтелектуалізації та якісного оновлення національної інфраструктури геопросторових даних на всіх рівнях її функціонування. Обґрунтовано, що безпілотники доцільно розглядати не як окремі технічні пристрої для дистанційного зондування, а як невід'ємні високотехнологічні складові сучасних геоінформаційних систем. Такий підхід уможливорює перехід від дискретних процедур збирання інформації до безперервного моніторингового циклу та постійного оновлення просторових рішень. Окреслено технологічну взаємодоповнюваність методів фіксації геоданих. Доведено, що отримані завдяки цим технологічним рішенням високоточні цифрові моделі рельєфу, а також просторово прив'язані тривимірні масиви й текстуровані моделі місцевості повністю відповідають найсуворішим нормативним вимогам щодо рівня деталізації та геометричної точності. Це відіграє критично важливу роль у подоланні гострої проблеми хронічного морального й технічного старіння наявних картографічних матеріалів та кадастрової документації в умовах безперервної й динамічної урбанізації сучасних територіальних громад.

У межах проведеного дослідження було також виокремлено й систематизовано деструктивні чинники, які перешкоджають упровадженню

безпілотних авіаційних систем. З цією метою здійснено описовий аналіз та класифікацію ключових перешкод за трьома основними аналітичними напрямками. Перший, технічний напрям, визначається критичними обмеженнями щодо енергоємності вбудованих джерел живлення та, відповідно, тривалості польотних місій, високою вразливістю бортового обладнання до несприятливих гідрометеорологічних умов, а також проявами ефекту «міських каньйонів», що супроводжується масштабною інтерференцією, багатопроменевістю та затуханням радіосигналів і супутникових даних у щільній просторовій структурі урбанізованої забудови. Другий, організаційно-економічний деструктивний напрям, охоплює значний фінансовий поріг початкових інвестицій, необхідних для придбання ліцензійного спеціалізованого програмного забезпечення для високоточного фотограмметричного моделювання, а також посилення дефіциту висококваліфікованих конвергентних фахівців, здатних ефективно поєднувати фундаментальні засади класичної прикладної геодезії із сучасним інструментарієм геоінформаційного аналізу. Третій, нормативно-правовий та безпековий напрям, зумовлений імперативними та жорсткими регуляторними обмеженнями щодо експлуатації цивільного повітряного простору в умовах тривалого правового режиму воєнного стану, що вимагає складного алгоритму міжвідомчого погодження, санкціонування та багаторівневої верифікації параметрів кожної польотної місії з боку профільних оборонних відомств та органів військового управління.

У відповідь на виявлені виклики розроблено та обґрунтовано концепцію гібридного (бінарного) геодезичного забезпечення. Шляхом порівняльного аналізу встановлено, що традиційна наземна тахеометрія та супутникові спостереження (GNSS), маючи беззаперечну юридичну силу та високу точність, суттєво поступаються аерофотозніманням в оперативності та можливостях масштабування. Тому найбільш раціональним видається їхнє поєднання. Визначено прикладні горизонти та зони обмеженого застосування авторських напрацювань. Доведено, що запропонована синергетична концепція має стати

опорним елементом у процесі трансформації інституту національного кадастрового обліку та виступити базовою матрицею для формування комплексних планів перспективного просторового облаштування територіальних одиниць. Застосування розроблених у дослідженні методичних рекомендацій у практичній діяльності органів місцевої влади та суб'єктів господарювання у сфері землевпорядкування відкриває широкі можливості для істотного скорочення кошторисної вартості інженерно-геодезичних вишукувань, раціоналізації часових ресурсів на етапі збору первинних даних, а також гарантує формування релевантного й верифікованого геопросторового базису, необхідного для обґрунтування стратегічних управлінських рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнєцов В. О., Третьак К. Р. Геодезичний моніторинг та цифрове моделювання територій із застосуванням безпілотних літальних апаратів. *Геодезія, картографія і аерофотозйомка*. 2023. URL: <https://science.lpnu.ua/uk/istcgscap> (дата звернення: 15.05.2026)
2. Волошин О. І., Ковальчук В. М. Інтеграція LiDAR-сканерів та систем високоточного позиціонування RTK/PPK на БПЛА для потреб кадастру та містобудування. *Інженерна геодезія*. 2024. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/%D0%A2%D0%95%D0%97%D0%98_%D0%93%D0%95%D0%9E%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C_2025.pdf (дата звернення: 15.05.2026)
3. Цифрові двійники міст: геоінформаційне моделювання та землеустрій : монографія / за ред. А. М. Ляценка. Київ : Наукова думка, 2022. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/Smart_technologies/1_2024.pdf (дата звернення: 15.05.2026)
4. Малашевський М. А., Бугаєнко О. А. Проблеми оновлення картографічної основи при розробці генеральних планів населених пунктів України. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2021. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Zemleustriy/uk> (дата звернення: 15.05.2026)
5. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17 лют. 2011 р. № 3038-VI. *Відомості Верховної Ради України*. 2011. № 34. Ст. 343. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17> (дата звернення: 15.05.2026)
6. Повітряний кодекс України : Закон України від 19 трав. 2011 р. № 3393-VI. *Відомості Верховної Ради України*. 2011. № 48–49. Ст. 536. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17> (дата звернення: 15.05.2026)
7. Luhmann J., Robson S., Kyle S., Boehm J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 3rd ed. Berlin : De Gruyter, 2020. 684 p. URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783110607253/html> (дата звернення: 15.05.2026)

8. Мартин А. Г., Краснолуцький О. В. Моніторинг земель та державний контроль за використанням і охороною земель із застосуванням дистанційного зондування. *Землевпорядний вісник*. 2023. № 4. С. 12–19.
9. Шульц Р. В., Білоус М. В. Проектування та моніторинг лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури за допомогою лазерного сканування з БПЛА. *Містобудування та територіальне планування*. 2022. Вип. 79. С. 315–327.
10. Паньків З. П. Екологічний моніторинг урбанізованих територій та оптимізація міського землекористування. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 210 с. URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/09/monohrafiia-Theory-practice-of-genetic-soil-science-2023-book.pdf> (дата звернення: 15.05.2026)
11. Карабін В. В., Дорош О. С. Застосування безпілотних літальних апаратів у гуманітарному розмінуванні та оцінці руйнувань територій внаслідок воєнних дій. *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. № 2 (46). С. 65–78.
12. Eisenbeiss H. UAV Photogrammetry : Doctoral thesis. Zurich : ETH Zurich, 2019. 235 p.
13. Про Державний земельний кадастр : Закон України від 7 лип. 2011 р. № 3613-VI. *Відомості Верховної Ради України*. 2012. № 8. Ст. 61. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17> (дата звернення: 15.05.2026)
14. Земельний кодекс України : Закон України від 25 жовт. 2001 р. № 2768-III. *Відомості Верховної Ради України*. 2002. № 3–4. Ст. 27. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення: 15.05.2026)
15. Баєр О. О. Концепція сталого розвитку в сучасному містобудуванні: від теорії до геоінформаційної практики. *Просторовий розвиток*. 2023. № 3. С. 41–53.
16. Гадзах М. В. Сталий просторовий розвиток територіальних громад: інструменти ГІС та екологічного менеджменту. *Природокористування та аудит*. 2024. № 1. С. 104–115.

17. Nex F., Remondino F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review. *Applied Geomatics*. 2014. Vol. 6, No. 1. P. 1–15.
18. Дорош Ю. М., Купріянич І. П. Діджиталізація землеустрою та формування просторових даних громад на основі аерознімальних робіт. *Економіка та управління АПК*. 2022. № 2. С. 89–99.
19. Koparan C., Kos A. B., Privette C. V. In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. *Water*. 2018. Vol. 10, No. 3. P. 264. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/3/264> (дата звернення: 15.05.2026)
20. Колос В. В., Панас Р. М. Застосування мультиспектральних сенсорів БПЛА для моніторингу лісових масивів та оцінки деградації екосистем. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2023. Вип. 142. С. 130–139.
21. Токарь О. І. Точне землеробство: використання безпілотних авіаційних систем в агромоніторингу та оцінці ґрунтового покриття. *Агроекологічний журнал*. 2022. № 4. С. 77–85.
22. Tmušić G., Manfreda S., Aasen H. et al. Current Practices in Unmanned Aerial Systems (UAS) Imagery Collection for Close Range Environmental Monitoring. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, No. 9. P. 538. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/9/538> (дата звернення: 15.05.2026)
23. Про правовий режим воєнного стану : Закон України від 12 трав. 2015 р. № 389-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2015. № 28. Ст. 250. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19> (дата звернення: 15.05.2026)
24. Антонов Д. М., Шаповал Ю. В. Методи геопросторового аналізу та Kernel Density Estimation (KDE) для оцінки щільності міської забудови за даними БПЛА. *Сучасні геоінформаційні системи*. 2024. № 2. С. 44–53.
25. Антонов Д. М., Шаповал Ю. В. Методи геопросторового аналізу та Kernel Density Estimation (KDE) для оцінки щільності міської забудови за даними БПЛА. *Сучасні геоінформаційні системи*. 2024. № 2. С. 44–53.