

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ЗЕМЕЛЬНОГО КАДАСТРУ**

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

к.е.н., доцент

Оксана МАЛАЩУК

«___» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти
Освітньої програми «Геодезія та землеустрій»
за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій»**

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА ДЛЯ ПОТРЕБ ЗЕМЛЕУСТРОЮ

Науковий керівник: к.е.н., доцент

Оксана МАЛАЩУК

Рецензент:

Виконав: здобувач заочної форми навчання

Олег ЖЕКЮ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень.*

*Використання ідей і текстів інших авторів
має посилання на відповідне джерело.*

Олег ЖЕКЮ

ОДЕСА – 2026

РЕФЕРАТ

Створення цифрової моделі місцевості території с. Бендзари Балтської громади за даними аерофотозйомки з БпЛА для вирішення земельпорядних завдань. ЖЕКЮ О.С. Кваліфікаційна робота. ОДАУ, кафедра геодезії, землеустрою та земельного кадастру. 2026. 71 с. текстової частини, 12 таблиць, 12 рисунків, 23 літературних джерел.

Текстова частина включає: вступ, теоретичні основи створення цифрових моделей місцевості за даними БпЛА, технологія виконання польових робіт для створення цифрової моделі місцевості, технологія фотограмметричної обробки даних та створення цифрової моделі місцевості, оцінка точності цифрової моделі та перспективи застосування в землеустрої, висновки, список використаних джерел.

Графічна частина включає: 1. Схема розташування опорних та контрольних точок на території с. Бендзари. 2. Схема планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату. 3. Цифрова модель місцевості с. Бендзари.

Ключові слова: ЦИФРОВА МОДЕЛЬ МІСЦЕВОСТІ, БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, АЕРОФОТОЗЙОМКА, ФОТОГРАММЕТРИЧНА ОБРОБКА, ОРТОФОТОПЛАН, КОНТРОЛЬНІ ТОЧКИ, ЗЕМЛЕУСТРІЙ, С. БЕНДЗАРИ, БАЛТСЬКА ГРОМАДА.

У кваліфікаційній роботі розроблено та обґрунтовано технологію створення цифрової моделі місцевості за даними аерофотозйомки з використанням безпілотного літального апарату DJI Phantom 4 RTK на території с. Бендзари Балтської міської територіальної громади.

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА ДАНИМИ БПЛА.....	9
1.1 Сутність цифрових моделей місцевості та огляд методів їх створення за допомогою БПЛА.....	9
1.2 Аналіз програмного забезпечення та нормативно-правової бази для фотограмметричної обробки даних.....	17
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ ПОЛЬОВИХ РОБІТ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІСЦЕВОСТІ.....	24
2.1 Природно-географічна характеристика території дослідження.	24
2.2 Геодезичне забезпечення аерофотозйомки та створення планово-висотної обґрунтування	30
2.3 Планування та виконання аерофотозйомки з використанням БПЛА.....	36
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЯ ФОТОГРАММЕТРИЧНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ТА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІСЦЕВОСТІ	47
3.1 Фотограмметрична обробка знімків: побудова хмари точок, цифрової моделі рельєфу та ортофотоплану.....	47
3.2 Векторизація об'єктів місцевості та створення топографічного плану території.....	51
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В ЗЕМЛЕУСТРОЇ.....	55
4.1 Оцінка точності створеної ЦММ.....	55
4.2 Аналіз можливостей використання результатів для ведення земельного кадастру, планування території та моніторингу довкілля.....	59
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку геодезії та землеустрою характеризується активним впровадженням цифрових технологій та методів дистанційного зондування Землі. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для створення цифрових моделей місцевості, що забезпечує високу точність, оперативність та економічну ефективність порівняно з традиційними методами топографічного знімання. В умовах реформи децентралізації та необхідності оновлення картографічних матеріалів територіальних громад, застосування технологій аерофотозйомки з БпЛА набуває особливого значення для вирішення землевпорядних завдань – інвентаризації земель, встановлення меж земельних ділянок, ведення Державного земельного кадастру та планування територій.

Теоретичні та практичні аспекти створення цифрових моделей місцевості за даними аерофотозйомки з БпЛА досліджували такі науковці, як О. Л. Дорожинський, Р. Тукай [8], В. В. Білоус, С. П. Боднар [5], Ю. В. Медведський [12], С. Андрєєв, В. Жилін [1], а також зарубіжні дослідження Jarahizadeh S., Salehi B. [22] та інші. Водночас питання комплексного застосування технології створення цифрових моделей місцевості для конкретних територіальних громад, зокрема Балтської міської територіальної громади, з оцінкою точності отриманих результатів та обґрунтуванням перспектив використання в землеустрої потребують подальшого дослідження, що зумовлює актуальність теми кваліфікаційної роботи.

Мета та завдання дослідження. Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є дослідження теоретичних засад та розроблення практичних рекомендацій щодо створення цифрової моделі місцевості території с. Бендзари Балтської громади за даними аерофотозйомки з БпЛА для вирішення землевпорядних завдань.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено такі завдання дослідження:

- розкрити сутність цифрових моделей місцевості та огляд методів їх створення за допомогою БпЛА;
- здійснити аналіз програмного забезпечення та нормативно-правової бази для фотограмметричної обробки даних;
- надати природно-географічну характеристику території с. Бендзари Балтської громади;
- виконати геодезичне забезпечення аерофотозйомки та створити планово-висотне обґрунтування території дослідження;
- здійснити планування та виконання аерофотозйомки з використанням безпілотного літального апарата DJI Phantom 4 RTK;
- провести фотограмметричну обробку знімків: побудову хмари точок, цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі місцевості та ортофотоплану;
- виконати векторизацію об'єктів місцевості та створити топографічний план території с. Бендзари масштабу 1:2000;
- провести оцінку точності створеної цифрової моделі місцевості шляхом порівняння з контрольними точками;
- проаналізувати можливості використання отриманих результатів для ведення земельного кадастру, планування території та моніторингу довкілля.

Об'єктом дослідження є територія с. Бендзари Балтської міської територіальної громади Подільського району Одеської області.

Предметом дослідження є технологічний процес створення цифрової моделі місцевості за даними аерофотозйомки з БпЛА, методи фотограмметричної обробки, оцінка точності та перспективи застосування результатів у землеустрої.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження. Зокрема, методи аналізу та синтезу використано для дослідження теоретичних

аспектів створення цифрових моделей місцевості та методів фотограмметричної обробки. Абстрактно-логічний метод застосовано для узагальнення наукових підходів та формування висновків дослідження. Польові методи використано для виконання аерофотозйомки з використанням БПЛА DJI Phantom 4 RTK, визначення координат наземних контрольних точок методом GNSS-спостережень та створення планово-висотного геодезичного обґрунтування. Камеральні методи включали фотограмметричну обробку знімків у програмному забезпеченні Agisoft Metashape з використанням алгоритмів Structure from Motion (SfM) для побудови хмари точок, цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі місцевості та ортофотоплану. Методи математичної статистики (зокрема розрахунок середньої квадратичної похибки за формулою Бесселя) використано для оцінки точності створеної моделі. Графічний метод застосовано для наочного представлення результатів дослідження (ортофотоплани, схеми, тривимірна візуалізація). Картографічний метод використано для створення топографічного плану території с. Бендзари масштабу 1:2000.

Інформаційну базу дослідження становлять: нормативно-правові акти України, що регулюють виконання топографо-геодезичних та землепорядних робіт, зокрема Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, затверджений наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675 [16], Повітряний кодекс України [13]; аерофотознімки території с. Бендзари, отримані за допомогою безпілотного літального апарата DJI Phantom 4 RTK; координати наземних контрольних точок (GCP) та перевірних точок (CP), визначені методом GNSS-спостережень у системі координат УСК-2000 та Балтійській системі висот; наукові праці вітчизняних і зарубіжних авторів у сфері фотограмметрії, геодезії, дистанційного зондування Землі та землеустрою; картографічні матеріали та супутникові знімки території дослідження; офіційні веб-сайти Балтської міської ради [2], Державної служби України з

питань геодезії, картографії та кадастру, а також інформаційно-довідкові ресурси.

Практична значущість роботи полягає в тому, що створена цифрова модель місцевості, ортофотоплан та топографічний план масштабу 1:2000 території с. Бендзари можуть бути безпосередньо використані Балтською міською територіальною громадою для оновлення картографічних матеріалів, ведення Державного земельного кадастру, інвентаризації земель, встановлення та узгодження меж земельних ділянок, планування територій та моніторингу стану довкілля, зокрема Бендзарівського ландшафтного заказника. Розроблена технологія створення цифрової моделі місцевості за даними аерофотозйомки з БпЛА може бути використана іншими територіальними громадами Одеської області при виконанні аналогічних землевпорядних робіт.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА ДАНИМИ БПЛА

1.1 Сутність цифрових моделей місцевості та огляд методів їх створення за допомогою БПЛА

Цифрова модель місцевості (ЦММ) є одним із ключових інструментів сучасної геодезії, геоінформатики та землеустрою, що забезпечує кількісне та якісне відображення просторових характеристик земної поверхні. Згідно з визначенням, закріпленим у нормативно-правових актах України, зокрема в Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, затвердженому наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675, ЦММ являє собою сукупність цифрової моделі контурів та цифрової моделі рельєфу [16]. Цифрова модель контурів відображає планове положення об'єктів місцевості (ситуацію), тоді як цифрова модель рельєфу фіксує висотні характеристики земної поверхні.

У більш широкому розумінні ЦММ – це цифрове представлення земної поверхні, створене на основі даних про рельєф та топологію місцевості, яке інтегрує інформацію про фізичні характеристики території та розміщені на ній об'єкти [11, с. 73].

Залежно від способу подання, розрізняють регулярні (растрові) та нерегулярні (тріангуляційні) моделі, кожна з яких має свої переваги для вирішення конкретних завдань. Регулярні моделі (GRID) ґрунтуються на регулярній сітці, де поверхня представляється у вигляді матриці комірок однакового розміру. Кожній комірці присвоюється певне значення, наприклад: висота для моделі рельєфу. Перевагами таких моделей є простота структури, висока швидкість обчислень та зручність для геопросторового аналізу. Недоліками вважають надмірність даних на рівнинних ділянках та можливу втрату деталей при зavelикому розмірі комірки.

Нерегулярні моделі (TIN – Triangulated Irregular Network) будуються на основі мережі трикутників різної форми та розміру, вершинами яких є вихідні точки з відомими координатами. Такі моделі є більш гнучкими, оскільки дозволяють згущувати сітку на складних ділянках рельєфу та розріджувати на рівнинних, що забезпечує оптимальне співвідношення точності та обсягу даних [8, 10].

Порівняльна характеристика регулярних та нерегулярних моделей наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – *Порівняльна характеристика регулярних та нерегулярних цифрових моделей*

Ознака порівняння	Регулярна модель (GRID)	Нерегулярна модель (TIN)
Структура даних	Регулярна сітка з квадратних комірок	Мережа трикутників різного розміру
Обсяг даних	Постійний, часто надмірний	Змінний, адаптований до рельєфу
Точність	Залежить від розміру комірки	Висока в ключових точках
Швидкість обробки	Висока	Нижча через складні обчислення
Основне застосування	Гідрологія, ГІС-аналіз, картографія	3D-візуалізація, інженерні задачі

Джерело: побудовано автором на основі [8, 10, 11]

Важливо розрізняти два суміжні, проте не тотожні поняття – цифрову модель рельєфу (ЦМР) та цифрову модель місцевості (ЦММ). ЦМР відображає виключно висотні характеристики земної поверхні, її форму та розташування ландшафтних елементів без урахування рослинності, будівель та інших об'єктів, що знаходяться на ній [8]. Точність ЦМР визначається щільністю вихідних точок та методом інтерполяції; для топографічних планів масштабу 1:2000 середня квадратична похибка висот не повинна перевищувати 0,2–0,3 м залежно від перерізу рельєфу [10, 16]. Цей тип моделей є основою для гідрологічного моделювання, аналізу схилів, прогнозування повеней та інших завдань, де важливим є саме рельєф без штучних спотворень. Крім того, ЦМР використовується для побудови

горизонталей, розрахунку об'ємів ґрунту при плануванні територій та аналізу стоку поверхневих вод [8].

Натомість ЦММ є більш інформативною структурою, оскільки містить дані про висоту земної поверхні разом з усіма наявними на ній об'єктами – будівлями, деревами, спорудами, дорогами. Формування ЦММ передбачає класифікацію точок хмари з віднесенням їх до різних класів (земна поверхня, рослинність, споруди тощо) та збереження всіх об'єктів без виключення [5]. Завдяки цьому ЦММ знаходить широке застосування в містобудуванні, плануванні територій, будівництві транспортних мереж, а також для потреб землеустрою та ведення Державного земельного кадастру [9]. Зокрема, за допомогою ЦММ виконують визначення висотних відміток будівель, розрахунок об'ємів насипів та виїмок, а також моделювання зон видимості та затінення [12]. Таким чином, ЦММ розглядається як узагальнена тривимірна модель території, що відображає як рельєфну основу, так і ситуаційне наповнення місцевості [8]. На відміну від ЦМР, яка моделює лише «голу» поверхню землі, ЦММ дозволяє враховувати всі об'єкти, що суттєво підвищує її практичну цінність для землепорядних та містобудівних завдань.

Порівняльна характеристика ЦМР та ЦММ наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – *Порівняльна характеристика цифрової моделі рельєфу та цифрової моделі місцевості*

Ознака порівняння	Цифрова модель рельєфу (ЦМР)	Цифрова модель місцевості (ЦММ)
Об'єкт відображення	Фізична поверхня Землі (гола земля)	Поверхня Землі з усіма об'єктами на ній
Включення рослинності	Не враховується	Враховується (дерева, кущі, трава)
Включення споруд	Не враховуються	Враховуються (будівлі, дороги, мости)
Основне застосування	Гідрологія, геоморфологія, прогнозування повеней	Землеустрій, містобудування, кадастр, навігація
Роздільна здатність	Як правило, нижча	Вища, з більшою деталізацією об'єктів
Складність створення	Менш складна	Більш складна через велику кількість об'єктів

Джерело: побудовано автором на основі [8, 9, 11, 16]

Створення цифрових моделей місцевості є багатоетапним процесом, що передбачає отримання, обробку та інтерпретацію просторових даних. Основними методами отримання вихідних даних для побудови ЦММ є наземні геодезичні методи (тахеометричне знімання, нівелювання, наземне лазерне сканування), аерофотозйомка з пілотованих літальних апаратів, супутникове знімання та аерофотозйомка з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [10]. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, які визначають сфери їх застосування. Порівняльна ефективність різних методів зйомки наведена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – *Порівняльна характеристика методів топографічної зйомки*

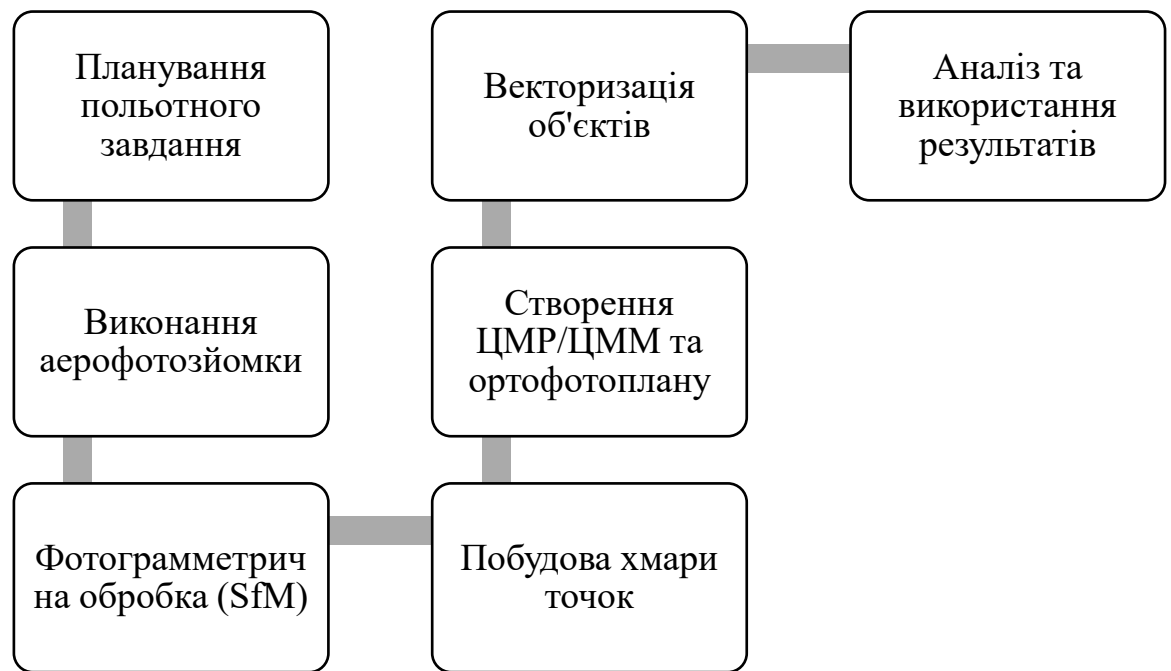
Метод зйомки	Точність	Продуктивність (га/зміну)	Вартість	Оперативність	Доцільність для територіальних громад
Наземне тахеометричне знімання	Висока (до 5 см)	Низька (до 5-10 га)	Висока	Низька	Недоцільний через великі затрати часу та ресурсів
Пілотована аерофотозйомка	Висока (до 5 см)	Висока (до 5000 га)	Дуже висока	Висока	Економічно не вигідний для невеликих об'єктів
Супутникове знімання	Середня (до 50 см)	Дуже висока	Низька	Висока	Обмежене використання через недостатню деталізацію
Зйомка з БПЛА	Висока (до 2-5 см)	Висока (до 500-1000 га)	Помірна	Висока	Оптимальний для більшості завдань ОТГ

Джерело: побудовано автором на основі [5, 10, 12]

Сучасна методика створення ЦММ за даними аерофотозйомки з БПЛА базується на фотограмметричному підході, центральне місце в якому посідає технологія Structure from Motion (SfM). SfM – це фотограмметрична техніка, яка використовує серію перекривних зображень однієї сцени, отриманих з різних ракурсів, для відновлення тривимірної структури об'єкта або місцевості [8]. Алгоритми SfM автоматично ідентифікують спільні точки на кількох знімках, визначають положення камери для кожного кадру та будують щільну тривимірну хмару точок, яка є основою для подальшого створення ЦММ, ЦМР та ортофотопланів. Важливою перевагою цього

методу є можливість отримання просторових даних високої роздільної здатності без використання дорогого спеціалізованого обладнання, що робить його доступним для широкого кола завдань у геодезії та землеустрої [5].

Технологічний процес створення ЦММ за даними БПЛА охоплює кілька послідовних етапів, які схематично відображено на рис. 1.1.



Джерело: побудовано автором на основі [1, 5, 8, 12]

Рисунок 1.1 – Схема технологічного процесу створення ЦММ за даними аерофотозйомки з БПЛА

На першому етапі виконується планування польотного завдання з урахуванням параметрів зйомки – висоти польоту, поздовжнього та поперечного перекриття знімків, просторової роздільної здатності. Від правильності цього етапу залежить якість кінцевих продуктів [8, 12].

Другий етап передбачає безпосереднє виконання аерофотозйомки з використанням БПЛА, оснащеного цифровою камерою та бортовою навігаційною системою. Сучасні БПЛА типу «літаюче крило» здатні за одну

зміну охопити територію до 1000 га, а роздільна здатність отриманих знімків може сягати 1 см на піксель [12].

Третій етап – фотограмметрична обробка отриманих матеріалів у спеціалізованому програмному забезпеченні, яке реалізує алгоритми SfM. На цьому етапі відбувається автоматичне вирівнювання знімків, ідентифікація спільних точок та побудова щільної хмари точок [5, 8].

Четвертий етап – побудова хмари точок, що містить тривимірні координати сотень мільйонів точок з високою щільністю. Ця хмара є основою для створення цифрових моделей рельєфу та місцевості [1, 5].

П'ятий етап передбачає створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР), цифрової моделі місцевості (ЦММ) та ортофотоплану. На цьому етапі виконується інтерполяція поверхні на основі хмари точок та формування растрових продуктів [5, 8].

Шостий етап – векторизація об'єктів місцевості та створення топографічного плану на основі отриманого ортофотоплану. Цей процес може виконуватися як автоматизовано, так і вручну з використанням ГІС-систем [5, 12].

Сьомий етап – аналіз та використання результатів, які застосовуються для вирішення конкретних завдань землеустрою, містобудування, ведення Державного земельного кадастру [1].

Важливим аспектом забезпечення точності кінцевих продуктів є використання наземних контрольних точок (Ground Control Points – GCP), координати яких визначаються на місцевості за допомогою високоточних GNSS-приймачів. Ці точки використовуються під час фотограмметричної обробки для калібрування моделі та досягнення необхідної точності [5, 8]. Застосування контрольних точок дозволяє зменшити середню квадратичну похибку створюваної моделі до сантиметрового рівня, що є критичним для вирішення землепорядних завдань [16].

Результатом застосування описаної методики є комплекс взаємопов'язаних картографічних продуктів: щільна хмара точок, що містить

тривимірні координати сотень мільйонів точок; цифрова модель рельєфу з просторовою роздільністю до 0,05 м; цифрова модель місцевості з високою деталізацією всіх наземних об'єктів; ортофотоплан з просторовою роздільністю до 0,02 м [5, 12].

Одним із ключових результатів фотограмметричної обробки є ортофотоплан – трансформоване зображення місцевості, приведене до єдиного масштабу. На відміну від звичайного знімка, ортофотоплан не містить геометричних спотворень, спричинених рельєфом місцевості та нахилом камери, що дозволяє використовувати його для точних вимірювань площ, відстаней та кутів.

Приклад фрагмента ортофотоплану наведено на рис. 1.2.



Джерело: побудовано автором на основі власних досліджень

Рисунок 1.2 – Приклад фрагмента ортофотоплану

Крім ортофотоплану, важливим продуктом обробки є тривимірна модель місцевості, яка візуалізує просторову структуру території з усіма об'єктами, що на ній розміщені. Така модель дозволяє оцінювати взаємне розташування об'єктів, проводити аналіз видимості, розраховувати об'єми ґрунту або будівельних матеріалів. Візуалізацію цифрової моделі місцевості у тривимірному вигляді наведено на рис. 1.3.



Джерело: побудовано автором на основі власних досліджень

Рисунок 1.3 – Візуалізація цифрової моделі місцевості у тривимірному вигляді

Наведені на рисунках зображення є типовими прикладами результатів фотограмметричної обробки даних з БПЛА. Отримані картографічні продукти мають безпосереднє практичне значення для вирішення завдань землеустрою. Ортофотоплани використовуються для інвентаризації земель, встановлення та узгодження меж земельних ділянок, виявлення невідповідностей фактичного використання земель з даними Державного земельного кадастру. Цифрові моделі місцевості є основою для планування територій, розробки схем землеустрою, моніторингу змін земельного покриття. Висока точність отриманих даних (до 2-5 см за координатами та до 5 см за висотами) забезпечує виконання вимог нормативних документів щодо топографічних матеріалів для землевпорядних робіт [12, 16].

На основі викладеного матеріалу можна констатувати, що застосування БПЛА для створення цифрових моделей місцевості є сучасним, науково-обґрунтованим та технологічно досконалим методом геопросторового

моделювання, що забезпечує високу точність, оперативність та економічну ефективність порівняно з традиційними підходами.

1.2 Аналіз програмного забезпечення та нормативно-правової бази для фотограмметричної обробки даних

Для реалізації технології створення цифрових моделей місцевості за даними аерофотозйомки з БПЛА необхідне використання спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечує виконання всіх етапів фотограмметричної обробки – від вирівнювання знімків до побудови кінцевих картографічних продуктів. Саме програмне забезпечення є тим інструментом, який перетворює сирі аерофотознімки на структуровані геопросторові дані, придатні для використання в землеустрої, кадастрі, містобудуванні та інших галузях. Вибір програмного забезпечення є критичним етапом, оскільки від нього залежать точність, деталізація та якість кінцевих моделей. Кожна програма має власні алгоритми обробки, які по-різному впливають на щільність хмари точок, якість ортофотоплану, швидкість обчислень та зручність роботи з даними.

На сьогоднішній день на ринку представлено декілька провідних програмних продуктів, які зарекомендували себе як надійні інструменти для обробки даних з БПЛА. До них належать Agisoft Metashape, Pix4Dmapper та DJI Terra. Кожен із цих продуктів має свої особливості, переваги та обмеження, що визначають сфери їхнього найефективнішого застосування [17]. Agisoft Metashape є універсальним інструментом, який здобув популярність завдяки гнучкості налаштувань та доступності. Pix4Dmapper є професійним рішенням, що широко використовується у великих комерційних проєктах. DJI Terra, своєю чергою, пропонує інтегроване рішення для користувачів дронів DJI. Порівняльна характеристика основних програмних продуктів для фотограмметричної обробки наведена в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика програмного забезпечення для фотограмметричної обробки даних з БПЛА

Програмний продукт	Ключові можливості	Переваги	Недоліки
Agisoft Metashape	Вирівнювання знімків, хмара точок, ЦМР, ЦММ, ортофотоплан, 3D-моделі, підтримка GCP, Python-скриптинг	Зручний інтерфейс, гнучкі налаштування, безкоштовна версія, безстрокова ліцензія, вдвічі швидший за Pix4D, щільні хмари точок	Висока вимогливість до апаратних ресурсів, менш автоматизований робочий процес
Pix4Dmapper	Автоматизована обробка, звіти про якість, класифікація точок, хмарна обробка, ортомозаїки, DSM, 3D-меші, теплові карти	Висока точність, підтримка великих проектів, галузевий стандарт, широка підтримка обладнання, автоматизований контроль якості	Висока вартість, складний інтерфейс, вдвічі довший час обробки
DJI Terra	Планування польотів, фотограмметрична обробка, інтеграція з дронами DJI, 2D-маппінг, ортомозаїки	Простота використання, висока швидкість, повна інтеграція, краще моделювання висотних контурів, менше пропусків у хмарі точок	Екосистемна прив'язка (тільки DJI), менш щільні хмари точок, обмежений функціонал для складних проектів

Джерело: побудовано автором на основі [17, 18, 20, 22, 23]

Одним із найпоширеніших програмних засобів є Agisoft Metashape (раніше – Agisoft Photoscan). Це програмне забезпечення розроблене компанією Agisoft LLC і призначене для фотограмметричної обробки як аерофотознімків, так і наземних зображень. Agisoft Metashape дозволяє виконувати повний цикл обробки: вирівнювання знімків, побудову щільної хмари точок, створення цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі місцевості, ортофотоплану та тривимірної моделі. Програма підтримує використання наземних контрольних точок для калібрування моделі, що забезпечує високу точність кінцевих продуктів, а також інтеграцію з ГІС та CAD-системами [17].

Серед переваг Agisoft Metashape слід відзначити зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, гнучкі налаштування параметрів обробки, підтримку різних форматів вхідних та вихідних даних, а також наявність безкоштовної версії з обмеженим функціоналом, що робить його доступним для

навчальних цілей. Важливою особливістю є можливість написання власних скриптів на Python, що дозволяє автоматизувати рутинні завдання та адаптувати програму під специфічні потреби дослідження. Agisoft Metashape використовує гібридну архітектуру обчислень із залученням як центрального процесора, так і графічного процесора, що забезпечує високу швидкодію при роботі з великими обсягами даних [23]. Програма є особливо популярною в науково-дослідних установах та закладах вищої освіти завдяки оптимальному співвідношенню ціни та функціональності.

Іншим потужним інструментом є Pix4Dmapper, розроблений компанією Pix4D. Це професійне програмне забезпечення, яке широко використовується в геодезії, сільському господарстві, будівництві та інших галузях. Pix4Dmapper забезпечує високу точність та швидкість обробки, автоматизоване створення звітів про якість, а також підтримує роботу з великими обсягами даних. Програма пропонує розширені можливості для класифікації хмари точок, створення контурних ліній, генерації ортомозаїк, цифрових моделей поверхні, 3D-текстурних моделей, теплових карт та інших продуктів [18]. Pix4Dmapper вважається галузевим стандартом для професійного картографування з дронів завдяки потужним можливостям фотограмметричної обробки та широкій підтримці різноманітного обладнання. Програма підтримує хмарну обробку даних, що дозволяє значно прискорити роботу над великими проектами [23]. Недоліками Pix4Dmapper є вища вартість порівняно з Agisoft Metashape та більш складний інтерфейс, що потребує певного часу для освоєння. Однак автоматизовані інструменти контролю якості та зрозумілий робочий процес роблять її привабливим вибором для професійних інженерів та геодезистів.

Компанія DJI пропонує власне програмне забезпечення DJI Terra, яке тісно інтегроване з її дронами. DJI Terra дозволяє планувати польотні завдання, виконувати фотограмметричну обробку та створювати кінцеві продукти безпосередньо в одному середовищі. Програма відзначається простотою використання та високою швидкістю обробки, однак має

обмежені можливості для складних проєктів порівняно з Agisoft Metashape та Pix4Dmapper. Важливою особливістю DJI Terra є екосистемна прив'язка: програма працює виключно з дронами DJI, що може бути як перевагою (повна інтеграція), так і обмеженням (неможливість обробки даних з інших дронів) [20].

Вибір конкретного програмного продукту для створення ЦММ залежить від низки факторів: масштабу території, необхідної точності, бюджету проєкту, наявного обладнання та кваліфікації виконавців. Для невеликих територій (до 500 га) та навчальних цілей оптимальним вибором є Agisoft Metashape завдяки доступній вартості та гнучкості налаштувань [17, 23]. Для великих комерційних проєктів, де потрібна висока точність і автоматизація, перевагу надають Pix4Dmapper, незважаючи на його вищу вартість та триваліший час обробки [18]. DJI Terra є найкращим вибором для користувачів, які вже мають парк дронів DJI та потребують швидкого отримання результатів без зайвих технічних складнощів [20]. Важливо зазначити, що жодна з програм не є універсальною – хоптимальний вибір визначається конкретними завданнями та умовами проєкту.

Порівняльний аналіз цих трьох програмних продуктів, проведений у низці наукових досліджень, дає змогу краще зрозуміти їхні сильні та слабкі сторони. Згідно з дослідженням Jarahizadeh та Salehi (2024), опублікованим у міжнародному науковому журналі Sensors, Pix4D та Agisoft генерують у 2,5 рази щільніші хмари точок порівняно з DJI Terra. Це означає, що вони здатні відтворювати більше деталей місцевості, що є критичним для створення високоточних цифрових моделей. Однак, попри меншу щільність точок, DJI Terra продемонструвала кращі результати в моделюванні висотних контурів дерев, будівель, ліній електропередач та стовпів завдяки вдосконаленому алгоритму пошуку відповідних точок та меншій кількості пропусків у хмарі точок [22]. Це робить її ефективним інструментом для моделювання об'єктів з чіткими геометричними формами.

Окрім вибору програмного забезпечення, на точність кінцевих продуктів суттєво впливають якість вихідних знімків, кількість та розташування наземних контрольних точок, а також параметри польотного завдання (висота польоту, перекриття знімків) [16]. Застосування RTK/PPK-технологій дозволяє значно підвищити точність моделей без використання великої кількості контрольних точок, що є особливо актуальним для великих територій або важкодоступних ділянок. Дослідження показують, що навіть за однакових вихідних даних різні програми можуть давати відмінності у висотних профілях до 2,5м, тому вибір ПЗ має бути обґрунтованим і відповідати вимогам конкретного проекту [22].

Дослідження також показало, що час обробки для Agisoft та DJI Terra є приблизно вдвічі меншим порівняно з Pix4D. Це може бути суттєвим фактором при роботі з великими обсягами даних або в умовах обмеженого часу. Крім того, оцінка висотних профілів цифрових моделей поверхні продемонструвала, що варіації висот між трьома програмами становлять від 0,5 м до 2,5 м, причому оцінки висот DJI Terra є загалом вищими, ніж в Agisoft та Pix4D [22]. Щодо точності, Pix4D та DJI Terra показали найкращі результати: середня квадратична похибка за 20 контрольними точками не перевищувала 10 см у плані та 30 см по вертикалі. Усі три програми підтримують роботу з RTK/PPK-даними для досягнення сантиметрової точності [18].

Використання спеціалізованого програмного забезпечення для обробки даних з БПЛА дозволяє значно скоротити час створення картографічних продуктів порівняно з традиційними методами. Якщо при наземному тахеометричному зніманні на створення топографічного плану площею 100га можуть знадобитися тижні, то за допомогою БПЛА та відповідного ПЗ цей процес займає кілька днів, включаючи польові роботи та камеральну обробку [12]. Автоматизовані алгоритми вирівнювання знімків, побудови хмари точок та створення ортофотопланів значно знижують вплив людського фактора на якість кінцевих продуктів, що є важливим для забезпечення метрологічної

надійності результатів [18]. Крім того, цифровий формат отриманих даних забезпечує їх легку інтеграцію в ГІС-системи та можливість багаторазового використання для різних цілей.

Важливим аспектом використання БПЛА в Україні є дотримання нормативно-правових вимог, що регулюють виконання аерофотозйомки та створення картографічних матеріалів. З лютого 2022 року на території України діє воєнний стан, який суттєво впливає на правила використання повітряного простору [14]. Основним документом, що регулює використання повітряного простору України, є Повітряний кодекс України, який визначає правові засади діяльності у сфері авіації, порядок використання повітряного простору та відповідальність за порушення його правил [13]. Згідно зі статтею 30 Кодексу, а також офіційними повідомленнями, повітряний простір України для цивільних користувачів є повністю закритим, за винятком польотів сил Збройних Сил України та установ, що забезпечують безпеку держави [14].

Безпосередньо порядок виконання польотів БПЛА в Україні регулюється «Правилами виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України», затвердженими наказом Міністерства оборони України від 08.12.2016 № 661. Цей документ, а також інші нормативно-правові акти, встановлюють вимоги до реєстрації БПЛА, сертифікації, отримання дозволів на виконання польотів, а також визначають обмеження щодо висоти польотів, зон заборони та умов видимості [15]. Під час дії воєнного стану діють додаткові обмеження, зокрема заборона польотів БПЛА у прифронтових областях та регіонах з підвищеним ризиком обстрілів, а також над об'єктами критичної інфраструктури без спеціального дозволу. Спеціальні дозволи на польоти дронів видаються в особливих випадках для виконання критично важливих завдань, таких як моніторинг інфраструктури або сільськогосподарські потреби, за погодженням з військовими адміністраціями [14].

Окремо слід зазначити, що в умовах воєнного стану загальна реєстрація нових цивільних дронів не є актуальною через заборону їх використання [15]. Правоохоронні органи та військові мають право затримувати дрони та їх операторів у разі порушення правил або за підозри у незаконній діяльності [14]. Міністерство оборони України продовжує вдосконалювати нормативну базу: у 2025 році було затверджено зміни до ключових чотирьох наказів про використання безпілотників, скасувавши неактуальні положення [15].

Створення картографічних матеріалів для землевпорядних цілей регулюється Порядком топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, затвердженим наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675 [16], а також Законами України «Про Державний земельний кадастр» [6], «Про землеустрій» [4] та «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» [19]. Ці документи визначають вимоги до точності, змісту та оформлення картографічних матеріалів, які використовуються для ведення Державного земельного кадастру та виконання землевпорядних робіт.

Отже, для успішної реалізації технології створення ЦММ за даними аерофотозйомки з БПЛА необхідно враховувати як технічні аспекти (вибір відповідного програмного забезпечення з урахуванням його переваг та обмежень), так і нормативно-правові вимоги (дотримання правил виконання польотів, отримання необхідних дозволів та вимог до картографічних матеріалів). Подальше дослідження передбачає практичну реалізацію описаної методики для конкретної території з використанням вибраного програмного забезпечення та з дотриманням нормативних вимог.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ ПОЛЬОВИХ РОБІТ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІСЦЕВОСТІ

2.1 Природно-географічна характеристика території дослідження

Важливою передумовою виконання геодезичних і фотограмметричних робіт є комплексне вивчення території дослідження, оскільки природно-географічні, адміністративно-територіальні, інженерно-геологічні та соціально-економічні особливості місцевості безпосередньо впливають на вибір технології виконання польових робіт, параметри аерофотознімання, розміщення наземних опорних точок, а також точність побудови цифрової моделі місцевості та кінцевих картографічних матеріалів.

Під час створення цифрової моделі місцевості за матеріалами аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів особливе значення мають площа території, характер рельєфу, наявність забудови, рослинності, водних об'єктів, транспортної мережі та інших природних і антропогенних елементів. Сукупність цих факторів визначає оптимальну висоту польоту безпілотного літального апарата, величину поздовжнього та поперечного перекриття аерофотознімків, необхідну кількість маршрутів польоту, розташування наземних контрольних точок та особливості подальшої фотограмметричної обробки отриманих матеріалів.

Крім того, аналіз природних умов території дозволяє оцінити можливі фактори, які можуть впливати на якість аерофотознімання, зокрема особливості освітлення місцевості, наявність значних перепадів висот, лісових масивів, густої забудови або інших об'єктів, що можуть спричиняти затінення чи ускладнювати процес отримання якісних фотограмметричних даних. Вивчення адміністративно-територіальних особливостей, сучасного використання земель та інфраструктури населеного пункту також є необхідним для подальшого практичного використання створених цифрових моделей у сфері землеустрою, ведення державного земельного кадастру,

містобудівної діяльності, моніторингу земель та управління територіальним розвитком.

Об'єктом дослідження у даній роботі обрано територію села Бендзари Балтської міської територіальної громади Подільського району Одеської області. Вибір цієї території зумовлений її репрезентативністю для виконання аерофотознімання із застосуванням безпілотних літальних апаратів, різноманітністю об'єктів місцевості, наявністю сільськогосподарських угідь, житлової забудови, транспортної інфраструктури та об'єктів природного середовища, що дозволяє комплексно продемонструвати технологію створення цифрової моделі місцевості та оцінити можливості використання сучасних фотограмметричних методів у землевпорядній практиці.

Село Бендзари розташоване в північно-західній частині Одеської області, у Подільському районі, та входить до складу Балтської міської територіальної громади. До 2020 року село належало до Балтського району, а до 2016 року було адміністративним центром Бендзарівської сільської ради, якій також підпорядковувалося село Андріяшівка [3]. Після реформи адміністративно-територіального устрою Бендзари увійшли до складу Балтської міської територіальної громади, яка об'єднує одне місто (Балта) та 33 сільські населені пункти. Загальна площа територіальної громади становить 1041,8 км² [2].



Джерело: побудовано автором на основі [21]

Рисунок 2.1 – Супутниковий знімок території с. Бендзари

Перші письмові згадки про село належать до середини XVIII століття [3, 6]. Археологічними дослідженнями встановлено, що територія сучасного населеного пункту була заселена ще у III тисячолітті до н. е., про що свідчать залишки поселення трипільської культури, а також пам'ятки II–V століть н. е. [3].

Географічні координати села: 47°55'51" пн. ш., 29°39'51" сх. д. Абсолютна висота над рівнем моря становить 122 м, площа населеного пункту – 2,19 км² [6]. Відстань до районного центру м. Балти становить 4 км, до найближчої залізничної станції Балта на лінії Одеса–Харків – 7 км. Через село проходить автошлях Балта – Гольма, який є важливою транспортною артерією, що з'єднує населені пункти громади та забезпечує зв'язок із районним центром. Кількість населення села за різними даними становить від 1040 до 1370 осіб [3]. За даними Вікіпедії, населення Бендзар становить 1 316 осіб, густота населення 474,9 осіб/км² [6]. Динаміка чисельності населення протягом останніх десятиліть свідчить про відносно стабільну демографічну ситуацію, що характерно для більшості сільських населених пунктів Подільського району.

Територія дослідження характеризується переважанням малоповерхової індивідуальної житлової забудови, присадибних земельних ділянок, вулично-дорожньої мережі та значних площ сільськогосподарських угідь. Забудова села формувалася переважно вздовж центральної дороги, що є типовим для сільських населених пунктів північної частини Одеської області. Більшість житлових будинків являють собою одноповерхові споруди з присадибними ділянками, розмір яких коливається від 0,10 до 0,25 га, що забезпечує ведення особистого селянського господарства. Така структура землекористування створює сприятливі умови для застосування сучасних методів дистанційного зондування Землі. Відсутність багатоповерхової забудови та значних вертикальних перешкод забезпечує високу ефективність виконання аерофотознімання з використанням безпілотних літальних

апаратів, оскільки відкриті простори сприяють вільному проходженню радіосигналів та якісному отриманню знімків без суттєвих затінь.

Територія села розташована в межах Подільської височини, яка є частиною Східноєвропейської рівнини. Рельєф місцевості переважно рівнинний, з невеликими коливаннями висот, що зумовлено геологічною будовою території, де переважають лесові відклади та кристалічні породи фундаменту, перекриті товщею осадових порід. Абсолютні висоти в межах 120–130 м над рівнем моря створюють сприятливі умови для ведення сільськогосподарського виробництва. Територія характеризується помірно-континентальним кліматом з м'якою зимою та теплим літом. Середньорічна температура повітря становить близько $+8...+9^{\circ}\text{C}$. Середньорічна кількість опадів коливається в межах 450–500 мм, що є типовим для лісостепової зони України. Безморозний період триває в середньому 160–170 днів на рік, що дозволяє вирощувати широкий спектр сільськогосподарських культур, включаючи теплолюбні (кукурудза, соняшник) та озимі (пшениця, жито). Переважаючими вітрами є північно-західні та південно-східні, що впливає на мікрокліматичні умови окремих частин території.

Гідрографічна мережа території представлена річкою Кодимою, яка протікає поблизу села [6]. Кодима є правою притокою Південного Бугу і належить до басейну Чорного моря. Довжина річки становить близько 150 км, ширина русла в межах території дослідження не перевищує 10–15 м, глибина коливається від 0,5 до 2,0 м залежно від сезону. Водний режим річки характеризується весняним водопіллям, зумовленим таненням снігу, та літньо-осінньою меженню, коли рівень води значно знижується. Наявність водної артерії впливає на зволоженість території та формування місцевого мікроклімату, створюючи сприятливі умови для рослинності в прибережній зоні. Крім того, річка є джерелом водопостачання для сільськогосподарських потреб, що особливо актуально в посушливі періоди.

Ґрунтовий покрив території представлений переважно чорноземами типовими та опідзоленими, які сформувалися на лесових породах. Чорноземи

характеризуються високою родючістю, значним вмістом гумусу (4–6 %) та сприятливими фізико-хімічними властивостями, зокрема нейтральною або слабкокислою реакцією ґрунтового розчину (рН 6,5–7,2), що створює передумови для ефективного сільськогосподарського використання земель. Ґрунтоутворювальними породами є леси та лесовидні суглинки, які забезпечують добрий водно-повітряний режим кореневмісного шару та сприяють розвитку кореневої системи культурних рослин. Потужність гумусового горизонту досягає 60–80 см, що є одним із найвищих показників для ґрунтів Одеської області. Однак інтенсивне сільськогосподарське використання вимагає застосування заходів із збереження родючості, зокрема внесення органічних та мінеральних добрив, дотримання сівозмін та застосування ґрунтозахисних технологій обробітку.

Особливе значення для території має Бендзарівський ландшафтний заказник (також відомий як Бендзарський ліс), розташований поблизу села. Це ландшафтний заказник місцевого значення, створений у 1993 році. Його площа становить 30 га. Заказник перебуває у віданні ДП «Балтське лісове господарство» [7]. Наявність цього об'єкта природно-заповідного фонду свідчить про високу природну цінність прилеглих територій та необхідність збереження їхнього ландшафтного та біологічного різноманіття. У межах заказника збереглися характерні для Подільської височини лісостепові ландшафти з переважанням грабово-дубових насаджень, що є оселищем для багатьох видів флори та фауни, зокрема рідкісних та зникаючих, занесених до Червоної книги України. Заказник виконує також важливу водоохоронну та ґрунтозахисну функції, запобігаючи ерозійним процесам на прилеглих схилах.

Землекористування на території села зосереджене переважно в аграрному секторі. Основними напрямками сільськогосподарської діяльності є рільництво та тваринництво [3]. Вирощуються зернові культури (пшениця, ячмінь, кукурудза), технічні культури (соняшник, цукрові буряки), а також кормові культури для забезпечення тваринництва. Структура посівних площ

щороку коригується залежно від кон'юнктури ринку та погодних умов, однак традиційно переважають зернові культури, які займають до 60–70 % ріллі. Тваринництво представлене вирощуванням великої рогатої худоби, свиней та птиці, що забезпечує місцеве населення продуктами харчування та створює додаткові робочі місця.

Соціальна інфраструктура села є розвиненою. У Бендзарах функціонує Бендзарівський ліцей імені Т. П. Боднар – загальноосвітній навчальний заклад I–III ступенів, розташований за адресою: вул. Миру, 52. Ліцей має комунальну форму власності. Спроможність закладу становить 350 учнів, фактична кількість учнів – 124, кількість персоналу – 25, класів – 11. У ліцеї функціонує один інклюзивний клас [19]. Крім школи, у селі діють бібліотека та клуб [3], які є центрами культурного життя громади. Наявність об'єктів соціальної інфраструктури свідчить про стабільне функціонування населеного пункту та визначає особливості забудови території, зокрема концентрацію громадських будівель у центральній частині села. Також на території села функціонують заклади торгівлі та побутового обслуговування, що задовольняють повсякденні потреби мешканців.

З позицій геодезичного забезпечення територія характеризується достатньою відкритістю місцевості, що сприяє стабільному прийманню сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) під час визначення координат наземних опорних точок. Відсутність високих будівель, густих лісових масивів та промислових об'єктів, які могли б створювати радіотехнічні перешкоди, забезпечує надійне позиціонування в будь-яку пору року. Це, своєю чергою, забезпечує високу точність геоприв'язки аерофотознімків і побудови цифрової моделі місцевості. Крім того, наявність відкритих просторів спрощує візуальне орієнтування та проведення наземних геодезичних вимірювань.

Територія села має сприятливі умови для проведення геодезичних досліджень, зокрема для створення цифрових моделей місцевості за даними аерофотозйомки з БПЛА, що зумовлено як її порівняно невеликою площею,

так і рівнинним характером рельєфу. Відсутність значного перепаду висот, відкриті сільськогосподарські угіддя та помірна лісистість території сприяють ефективному виконанню аерофотозйомки та отриманню якісних знімків з мінімальними спотвореннями. Крім того, наявність чітких природних та антропогенних орієнтирів (дороги, межі полів, водні об'єкти) спрощує процес дешифрування знімків та ідентифікації об'єктів місцевості під час фотограмметричної обробки.

Територія с. Бендзари Балтської громади характеризується вигідним географічним положенням, сприятливими природно-кліматичними умовами, родючими ґрунтами, багатою історією, розвиненою соціальною інфраструктурою та наявністю об'єкта природно-заповідного фонду, що створює передумови для ефективного використання земельних ресурсів та впровадження сучасних геодезичних технологій у практику землепорядних робіт.

2.2 Геодезичне забезпечення аерофотозйомки та створення планово-висотної обґрунтування

Створення цифрової моделі місцевості за матеріалами аерофотозйомки з використанням безпілотних літальних апаратів потребує забезпечення високої просторової точності вихідних даних. Однією з основних передумов досягнення необхідної точності є створення планово-висотного геодезичного обґрунтування, яке забезпечує прив'язку фотограмметричних матеріалів до державної системи координат та висот. Якість геодезичного забезпечення безпосередньо впливає на точність побудови цифрової моделі місцевості, цифрової моделі рельєфу, ортофотоплану та інших картографічних матеріалів, що створюються за результатами аерофотозйомки.

Планово-висотне геодезичне обґрунтування являє собою систему наземних контрольних точок (Ground Control Points – GCP), координати яких визначаються високоточними геодезичними методами. Контрольні точки використовуються під час фотограмметричної обробки для зовнішнього

орієнтування аерофотознімків, геоприв'язки моделі та оцінювання точності отриманих результатів. Крім того, частина визначених точок може використовуватися як перевірні точки (Check Points – CP), що не беруть участі у калібруванні моделі, а застосовуються виключно для незалежного контролю точності.

Процес створення планово-висотного геодезичного обґрунтування складається з низки взаємопов'язаних етапів, починаючи від рекогностування території та вибору місць розташування контрольних точок і завершуючи формуванням каталогу координат, який використовується під час фотограмметричної обробки матеріалів аерофотозйомки. Узагальнену технологічну послідовність виконання зазначених робіт наведено на рисунку

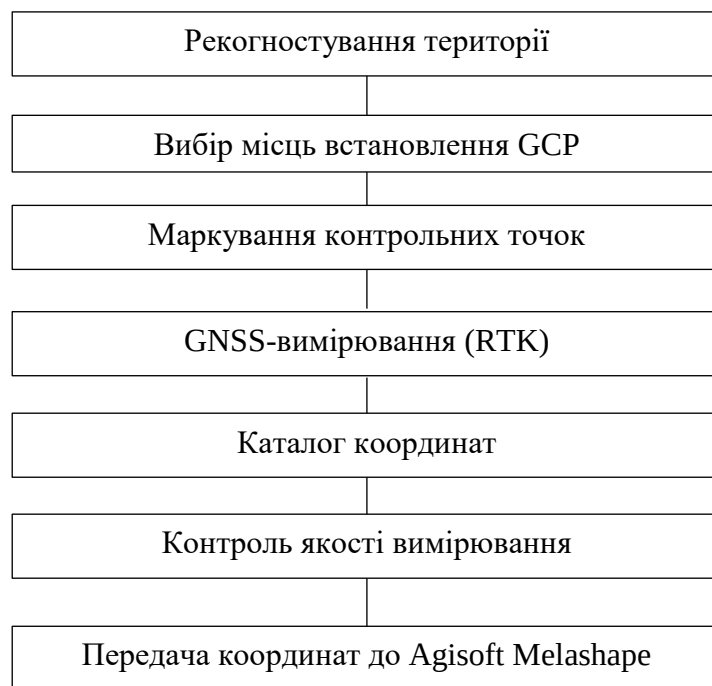


Рисунок 2.2 – Технологічна схема створення планово-висотного геодезичного обґрунтування

Як видно зі схеми, створення планово-висотного геодезичного обґрунтування здійснюється послідовно та включає рекогностування території, закладання контрольних точок, визначення їх координат із

використанням GNSS-технологій, формування каталогу координат і передачу отриманих даних для подальшої фотограмметричної обробки. Кожен із наведених етапів є необхідною складовою забезпечення високої точності цифрової моделі місцевості.

Геодезичне забезпечення аерофотознімання виконується відповідно до вимог чинного законодавства України у сфері топографо-геодезичної діяльності та нормативних документів, що регламентують виконання топографо-геодезичних і землевпорядних робіт. Для визначення координат контрольних точок використовується державна система координат УСК-2000, а висоти визначаються у Балтійській системі висот, що забезпечує сумісність отриманих результатів із матеріалами Державного земельного кадастру та іншими державними геопросторовими даними.

Перед початком польових робіт виконується рекогностування території дослідження. Основною метою рекогностування є визначення оптимальних місць розташування контрольних точок, оцінка умов приймання супутникових сигналів, вибір відкритих ділянок місцевості та перевірка можливості їх упевненої ідентифікації на аерофотознімках. Особлива увага приділяється відсутності високої деревної рослинності, щільної забудови та інших перешкод, які можуть негативно впливати як на GNSS-вимірювання, так і на подальшу фотограмметричну обробку.

Для території села Бендзари площею 2,19 км² доцільним є використання 5–7 наземних контрольних точок, які рівномірно розташовуються по периметру ділянки та в її центральній частині. Така схема забезпечує рівномірне планове та висотне закріплення всієї території, мінімізує систематичні похибки фотограмметричної моделі та дозволяє отримати стабільну точність по всій площі дослідження. За необхідності додатково передбачаються одна-дві перевірні точки, які використовуються виключно для незалежної оцінки точності побудованої моделі.

На місцевості контрольні точки позначаються спеціальними геодезичними марками, які повинні добре розпізнаватися на

аерофотознімках. Найчастіше використовуються контрастні чорно-білі мішені квадратної або хрестоподібної форми розміром 40–60 см, що забезпечує їх надійну ідентифікацію на цифрових знімках із просторовою роздільною здатністю 2–3 см/піксель. Марки встановлюються на відкритих рівних ділянках із твердим покриттям або ущільненим ґрунтом, що гарантує незмінність їхнього положення протягом усього періоду польових робіт.

Визначення координат контрольних точок виконується із застосуванням сучасних супутникових геодезичних технологій. Для цього використовуються високоточні GNSS-приймачі, які підтримують роботу із супутниковими системами GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou. Вимірювання можуть виконуватися у двох режимах: статичному або кінематичному в реальному часі (Real-Time Kinematic, RTK).

Статичний метод забезпечує найвищу точність визначення координат і використовується переважно під час створення або згущення геодезичних мереж. Однак його застосування потребує тривалого часу спостережень та наступної камеральної обробки матеріалів. Зважаючи на відносно невелику площу території дослідження та необхідність оперативного виконання робіт, найбільш доцільним є застосування RTK-технології, яка забезпечує визначення координат контрольних точок безпосередньо в польових умовах із плановою точністю 1–3 см та висотною точністю 2–5 см. Передача диференціальних поправок здійснюється через мережу активних референцних GNSS-станцій, що дозволяє отримувати координати в режимі реального часу без необхідності подальшої постобробки.

Під час вимірювань для кожної контрольної точки визначаються просторові координати X , Y , H . Для підвищення достовірності результатів рекомендується виконувати не менше двох незалежних визначень координат із подальшим порівнянням та усередненням отриманих значень. Одночасно здійснюється фотофіксація кожної контрольної точки та ведеться польовий журнал, у якому зазначаються номер точки, час виконання вимірювань,

використане обладнання, режим спостережень, координати та короткий опис місця розташування.

Схему розташування контрольних точок на території с. Бендзари наведено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Схема розташування наземних контрольних та перевірних точок на території с. Бендзари

Контрольні точки розташовано рівномірно по всій території дослідження: по кутах ділянки, у центральній її частині та додатково закладено дві перевірні точки для незалежного контролю точності.

За результатами GNSS-вимірювань сформовано каталог координат контрольних точок (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Каталог координат наземних контрольних точок

№ точки	Тип точки	X (м)	Y (м)	H (м)	Призначення
GCP1	Контрольна	47.933699	29.657504	122.5	Геоприв'язка
GCP2	Контрольна	47.928024	29.697613	121.8	Геоприв'язка
GCP3	Контрольна	47.923765	29.696525	120.5	Геоприв'язка
GCP4	Контрольна	47.928004	29.656585	122.0	Геоприв'язка
GCP5	Контрольна	47.925243	29.670876	123.2	Геоприв'язка
GCP6	Контрольна	47.927256	29.674781	121.5	Геоприв'язка
GCP7	Контрольна	47.928608	29.676497	122.8	Геоприв'язка
CP1	Перевірна	47.931656	29.672549	124.0	Контроль точності
CP2	Перевірна	47.926624	29.679244	123.5	Контроль точності

Таблиця 2.2 – Основні характеристики контрольних точок

№	Показник	Значення
1	Площа території	2,19 км ²
2	Кількість GCP	7
3	Кількість CP	2
4	Загальна кількість точок	9
5	Система координат	УСК-2000
6	Система висот	Балтійська
7	Метод вимірювань	RTK GNSS
8	Планова точність	1–3 см
9	Висотна точність	2–5 см

Контрольні точки розташовуються рівномірно по всій території дослідження: по кутах ділянки, у центральній її частині та, за необхідності, на ділянках зі складнішими умовами рельєфу. Таке розміщення забезпечує рівномірне геодезичне обґрунтування аерофотозйомки та мінімізує виникнення локальних деформацій фотограмметричної моделі.

Після завершення польових робіт формується каталог координат контрольних точок, який є основним вихідним документом для подальшої фотограмметричної обробки. На етапі камеральної обробки координати контрольних точок імпортуються до програмного забезпечення Agisoft Metashape та використовуються для зовнішнього орієнтування аерофотознімків, геоприв'язки цифрової моделі місцевості й оцінювання точності отриманих результатів.

Контроль точності здійснюється шляхом порівняння координат контрольних та перевірних точок, визначених за результатами фотограмметричної обробки, з координатами, отриманими під час наземних геодезичних вимірювань. Основним показником точності є середня квадратична похибка (СКП), яка визначається окремо для планового положення та висотних відміток. Отримані значення повинні відповідати

вимогам чинних нормативних документів щодо створення топографічних планів відповідного масштабу.

Результатом виконання геодезичного забезпечення аерофотозйомки є створення планово-висотного геодезичного обґрунтування території дослідження, представленого каталогом координат наземних контрольних та перевірних точок, який забезпечує просторову прив'язку аерофотознімків і є основою для побудови високоточної цифрової моделі місцевості.

Отже, створення планово-висотного геодезичного обґрунтування є одним із ключових етапів технології аерофотозйомки з використанням безпілотних літальних апаратів. Використання сучасних GNSS-технологій, РТК-вимірювань та мережі активних референцних станцій дозволяє забезпечити сантиметрову точність визначення координат контрольних точок, що, своєю чергою, гарантує високу геометричну точність цифрової моделі місцевості, ортофотоплану та інших картографічних матеріалів, створених за результатами фотограмметричної обробки.

2.3 Планування та виконання аерофотозйомки з використанням БПЛА

Після створення планово-висотного геодезичного обґрунтування наступним етапом виконання дослідження є аерофотозйомка території із застосуванням безпілотного літального апарата. Саме на цьому етапі формується первинний масив просторових даних, який у подальшому використовується для побудови цифрової моделі місцевості, цифрової моделі рельєфу, ортофотоплану та інших цифрових картографічних матеріалів. Якість отриманих результатів значною мірою залежить від правильності планування польотного завдання, вибору обладнання, параметрів знімання та дотримання технології виконання аерофотозйомки.

Сучасний розвиток безпілотних авіаційних систем суттєво розширив можливості виконання топографо-геодезичних робіт. Використання безпілотних літальних апаратів дозволяє значно скоротити терміни польових

робіт, підвищити оперативність отримання геопросторової інформації та забезпечити високу точність цифрових моделей місцевості. Порівняно з традиційними методами топографічного знімання, аерофотозйомка з використанням БПЛА характеризується значно нижчою собівартістю робіт, можливістю оперативного оновлення просторових даних і високою деталізацією отриманих матеріалів.

Вибір типу безпілотного літального апарата визначається площею території дослідження, необхідною просторовою роздільною здатністю аерофотознімків, вимогами до точності кінцевих картографічних матеріалів та умовами виконання польотів. Для території села Бендзари, площа якого становить 2,19 км², найбільш доцільним є застосування багатороторного безпілотного літального апарата DJI Phantom 4 RTK, який спеціально розроблений для виконання високоточних геодезичних і фотограмметричних робіт. Основною перевагою зазначеної моделі є інтегрований високоточний GNSS-приймач із підтримкою технології Real-Time Kinematic (RTK), що забезпечує визначення просторового положення центру фотографування із сантиметровою точністю. Завдяки цьому значно зменшується кількість наземних контрольних точок, необхідних для геоприв'язки фотограмметричної моделі, а також підвищується загальна точність ортофотопланів і цифрових моделей місцевості.

Безпілотний літальний апарат DJI Phantom 4 RTK обладнаний цифровою камерою з матрицею розміром 1 дюйм та роздільною здатністю 20 Мп, що дозволяє отримувати аерофотознімки високої якості із мінімальними геометричними спотвореннями. Використання механічного затвора практично усуває ефект Rolling Shutter, який характерний для камер із електронним затвором і може негативно впливати на точність фотограмметричної обробки.

Застосування DJI Phantom 4 RTK для аерофотозйомки території с. Бендзари забезпечує необхідну просторову роздільну здатність, точність

геоприв'язки та продуктивність польових робіт, що створює надійну основу для побудови



високоякісної цифрової моделі місцевості.

Джерело: офіційний сайт DJI.

Рисунок 2.5 – Безпілотний літальний апарат DJI Phantom 4 RTK

Основні технічні характеристики безпілотного літального апарата наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики DJI Phantom 4 RTK

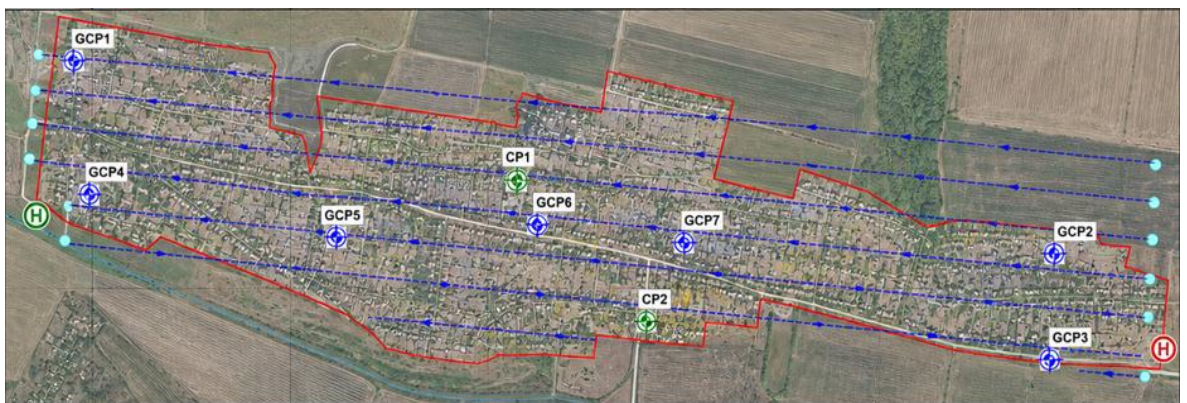
Параметр	Значення
Тип БПЛА	Багатороторний
Камера	RGB
Роздільна здатність камери	20 Мп
Розмір матриці	1" CMOS
Фокусна відстань	8,8 мм
Механічний затвор	Так
Максимальна тривалість польоту	до 30 хв
Максимальна швидкість польоту	50 км/год
RTK-приймач	Вбудований
Підтримувані GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Точність RTK	1–3 см

Аналіз наведених характеристик свідчить, що DJI Phantom 4 RTK повністю відповідає вимогам виконання великомасштабних топографічних знімань, створення цифрових моделей місцевості та ортофотопланів.

Поєднання високої геометричної точності, сучасної фотокамери та інтегрованої RTK-системи забезпечує отримання просторових даних, придатних для виконання геодезичних, картографічних і землевпорядних робіт.

Після вибору безпілотного літального апарата здійснюється планування польотного завдання. На цьому етапі визначаються межі території аерофотознімання, оптимальна висота польоту, параметри поздовжнього та поперечного перекриття аерофотознімків, напрямок маршрутів польоту, швидкість руху літального апарата, а також місце зльоту та посадки. Правильно спланований політ забезпечує повне покриття території дослідження, необхідну якість вихідних матеріалів і мінімізує ризик виникнення непридатних для обробки ділянок.

Для планування польотного завдання використовуються спеціалізовані програмні продукти DJI GS RTK, DJI Pilot 2, DJI Terra або інше програмне забезпечення, яке дозволяє автоматично формувати маршрути польоту відповідно до заданих параметрів. У програмі задаються межі території дослідження, необхідна просторова роздільна здатність, висота польоту, величина поздовжнього та поперечного перекриття аерофотознімків, після чого автоматично формується оптимальна траєкторія руху безпілотного



літального апарата.

Рисунок 2.6 – Схема планування маршрутів польоту безпілотного літального апарата

Як показано на рисунку 2.6, маршрути польоту формуються у вигляді паралельних ліній, що забезпечує рівномірне покриття всієї території дослідження та отримання необхідного перекриття між сусідніми аерофотознімками. Така схема польоту є найбільш поширеною під час виконання фотограмметричних робіт і забезпечує отримання якісного вихідного матеріалу для побудови цифрової моделі місцевості.

Планування параметрів аерофотозйомки. Після визначення меж території дослідження та вибору безпілотного літального апарата виконується планування основних параметрів аерофотозйомки. На цьому етапі встановлюються висота польоту, просторова роздільна здатність знімків (Ground Sample Distance – GSD), величина поздовжнього та поперечного перекриття, швидкість польоту, напрямок маршрутів та інші параметри, що безпосередньо впливають на якість фотограмметричної обробки й точність кінцевих картографічних матеріалів. Правильно підібрані параметри польоту забезпечують достатню кількість зв'язкових точок між сусідніми знімками, стабільне зовнішнє орієнтування фотограмметричної моделі та високу якість цифрової моделі місцевості.

Одним із найважливіших параметрів є висота польоту безпілотного літального апарата. Вона визначає площу місцевості, що потрапляє в один кадр, а також просторову роздільну здатність аерофотознімків. Зі збільшенням висоти польоту збільшується площа покриття території одним знімком, проте одночасно зменшується деталізація отриманих матеріалів. Навпаки, зменшення висоти польоту забезпечує вищу просторову роздільну здатність, але потребує більшої кількості маршрутів і збільшує тривалість польових робіт.

Для території села Бендзари, площа якої становить 2,19 км², оптимальною є висота польоту 80 м над поверхнею землі. Такий режим забезпечує отримання аерофотознімків із просторовою роздільною здатністю близько 2,2 см/піксель, що повністю відповідає вимогам щодо створення великомасштабних цифрових моделей місцевості, ортофотопланів та

топографічних планів масштабу 1:500–1:2000. Для рівнинної території із незначними перепадами висот підтримання сталої висоти польоту також забезпечує практично однакове значення GSD на всій площі дослідження, що позитивно впливає на якість фотограмметричної обробки.

Просторова роздільна здатність аерофотознімків характеризується величиною GSD (Ground Sample Distance), яка визначає розмір ділянки земної поверхні, що відповідає одному пікселю цифрового зображення. Чим меншим є значення GSD, тим вищою є деталізація отриманих знімків і точність побудови цифрових моделей.

Розрахунок GSD виконується за співвідношенням:

$$GSD = \frac{H \times p}{f} \quad (2.1)$$

де H – висота польоту, м; p – розмір пікселя матриці камери, мм;

f – фокусна відстань об'єктива, мм.

Для камери DJI Phantom 4 RTK при висоті польоту 80 м отримується GSD приблизно 2,2 см/піксель, що забезпечує впевнене дешифрування елементів місцевості, меж земельних ділянок, дорожньої мережі, окремих споруд та інших об'єктів.

Важливим елементом планування польоту є визначення величини поздовжнього та поперечного перекриття аерофотознімків. Поздовжнє перекриття характеризує ступінь накладання сусідніх знімків уздовж маршруту польоту, тоді як поперечне перекриття визначає перекриття між сусідніми маршрутами. Для створення високоточних цифрових моделей місцевості рекомендується використовувати поздовжнє перекриття 80% та поперечне 70%, що забезпечує достатню кількість спільних точок для алгоритмів Structure from Motion (SfM) та побудови щільної хмари точок.

Наступним параметром є швидкість польоту безпілотною літального апарата. Для забезпечення високої різкості аерофотознімків та мінімізації впливу змазування зображення швидкість польоту приймається в межах 5–7 м/с. У даному дослідженні доцільно використовувати швидкість 6 м/с, яка

забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю польових робіт та якістю отриманих знімків.

Для території дослідження маршрути польоту формуються у вигляді паралельних ліній, орієнтованих уздовж довшої сторони ділянки. Такий підхід дозволяє зменшити кількість розворотів безпілотного літального апарата, скоротити тривалість польоту та забезпечити рівномірне покриття всієї території аерофотознімання. У випадку складного рельєфу або наявності високих об'єктів можливе використання додаткових маршрутів, однак для території села Бендзари, що характеризується переважно рівнинною поверхнею, достатньо стандартної схеми паралельних маршрутів.

Таблиця 2.4 – Основні параметри аерофотозйомки території с. Бендзари

Показник	Значення
Площа території	2,19 км ²
Безпілотний літальний апарат	DJI Phantom 4 RTK
Висота польоту	80 м
Просторова роздільна здатність (GSD)	2,2 см/піксель
Поздовжнє перекриття	80 %
Поперечне перекриття	70 %
Швидкість польоту	6 м/с
Тип камери	RGB
Формат знімків	JPEG
Система координат	УСК-2000
Система висот	Балтійська

Планування польотного завдання також передбачає врахування метеорологічних умов. Аерофотознімання рекомендується виконувати за швидкості вітру не більше 5–7 м/с, відсутності атмосферних опадів та достатньої природної освітленості. Для зменшення впливу довгих тіней і забезпечення рівномірного освітлення поверхні польоти доцільно проводити в першій половині дня або в післяобідній час, коли сонце знаходиться на достатній висоті над горизонтом. Дотримання зазначених умов сприяє отриманню якісних аерофотознімків із рівномірною експозицією та високою

різкістю, що є необхідною передумовою для успішної фотограмметричної обробки.

Виконання аерофотозйомки та підготовка матеріалів до фотограмметричної обробки. Після завершення планування польотного завдання та налаштування параметрів аерофотознімання здійснюється безпосереднє виконання польових робіт. На цьому етапі особлива увага приділяється технічному стану безпілотного літального апарата, правильності функціонування навігаційної системи, роботі фотокамери та дотриманню вимог безпеки польотів. Від якості виконання польового етапу залежить повнота отриманого масиву аерофотознімків, що безпосередньо впливає на результати подальшої фотограмметричної обробки.

Перед початком польоту виконується комплекс підготовчих заходів, який включає перевірку технічного стану безпілотного літального апарата, заряд акумуляторних батарей, справність пропелерів, працездатність GNSS-приймача, калібрування інерціальної навігаційної системи (IMU), цифрового компаса та фотокамери. Крім того, здійснюється перевірка обсягу вільної пам'яті на карті пам'яті, коректності параметрів польотного завдання та якості приймання супутникових сигналів. Перед виконанням польоту оператор також оцінює метеорологічні умови, звертаючи увагу на швидкість і напрямок вітру, температуру повітря, наявність атмосферних опадів та рівень освітленості місцевості.

Для забезпечення стабільності польоту та високої якості фотоматеріалів рекомендується виконувати аерофотознімання за швидкості вітру не більше 5–7 м/с, відсутності атмосферних опадів та рівномірного природного освітлення. Значні пориви вітру можуть призводити до відхилення безпілотного літального апарата від запланованої траєкторії, а також викликати розмиття окремих знімків, що негативно позначається на процесі автоматичного пошуку зв'язкових точок під час фотограмметричної обробки. Для отримання максимально якісних матеріалів польоти рекомендується виконувати в умовах мінімальної хмарності та достатньої

висоти Сонця над горизонтом, коли на місцевості практично відсутні різкі тіні.

Після завершення підготовчих робіт здійснюється автоматичний або напіваавтоматичний політ відповідно до сформованого маршруту. У процесі польоту безпілотний літальний апарат підтримує задану висоту, швидкість руху та параметри фотографування, забезпечуючи рівномірне перекриття між суміжними аерофотознімками. Зйомка виконується у надирному положенні фотокамери, що дозволяє отримати матеріали, придатні для побудови ортофотоплану, цифрової моделі рельєфу та цифрової моделі місцевості.

Під час виконання польотного завдання оператор постійно контролює рівень заряду акумуляторної батареї, якість GNSS-сигналу, висоту польоту, швидкість руху та стан зв'язку між безпілотним літальним апаратом і наземною станцією керування. У разі виникнення небезпечних ситуацій або погіршення погодних умов політ припиняється, а маршрут виконується повторно після усунення причин, що могли вплинути на якість аерофотознімання.

Після завершення польоту здійснюється первинний контроль якості отриманих матеріалів. На цьому етапі перевіряються кількість отриманих фотографій, правильність їх геоприв'язки, відсутність пропусків між маршрутами, чіткість зображень, рівень експозиції та відсутність дефектів, що можуть ускладнити подальшу фотограмметричну обробку. Особлива увага приділяється повноті покриття території дослідження та відповідності фактичного перекриття знімків запланованим параметрам. Недостатнє перекриття або наявність нерізких фотографій можуть призвести до помилок автоматичного орієнтування знімків і погіршення точності побудови цифрової моделі місцевості.

Отримані аерофотознімки систематизуються за маршрутами польоту та копіюються на робочу станцію для подальшої обробки. Одночасно з фотографіями зберігаються журнали польотів, телеметричні дані, інформація про координати центрів фотографування та параметри зовнішнього

орієнтування, що записуються безпосередньо бортовою навігаційною системою безпілотного літального апарата. Комплексне використання фотоматеріалів та навігаційної інформації значно підвищує ефективність подальшої фотограмметричної обробки та забезпечує високу геометричну точність кінцевих результатів.

Для території села Бендзари результатом польового етапу є сформований комплект цифрових аерофотознімків із необхідним поздовжнім і поперечним перекриттям, що забезпечує можливість побудови щільної хмари точок, цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі місцевості та високоточного ортофотоплану. Усі матеріали підготовлено до подальшої камеральної обробки у спеціалізованому програмному забезпеченні Agisoft Metashape.

Таблиця 2.5 – Результати виконання аерофотозйомки території с. Бендзари

Показник	Значення
Площа аерофотознімання	2,19 км ²
Кількість польотів	2
Загальна тривалість польотів	34 хв
Кількість маршрутів	10
Кількість отриманих фотографій	420
Просторова роздільна здатність (GSD)	2,2 см/піксель
Поздовжнє перекриття	80 %
Поперечне перекриття	70 %
Формат фотографій	JPEG
Роздільна здатність фотографій	5472 × 3648 пікселів

Після завершення польового етапу всі отримані матеріали проходять остаточну перевірку, архівуються та готуються до камеральної обробки. На цьому етапі виконується структурування фотографій, перевірка цілісності файлів і формування робочого проекту, який надалі використовується для створення цифрової моделі місцевості.

Таким чином, виконання аерофотозйомки є завершальним етапом польових робіт, результатом якого є формування повного комплексу вихідних просторових даних для подальшої фотограмметричної обробки. Дотримання вимог до планування польоту, параметрів знімання та контролю якості забезпечує отримання аерофотоматеріалів, придатних для створення високоточних цифрових моделей місцевості та інших картографічних продуктів відповідно до вимог сучасного геодезичного виробництва.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЯ ФОТОГРАМЕТРИЧНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ТА СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІСЦЕВОСТІ

3.1 Фотограмметрична обробка знімків: побудова хмари точок, цифрової моделі рельєфу та ортофотоплану

Фотограмметрична обробка даних аерофотозйомки є ключовим етапом створення цифрової моделі місцевості, що забезпечує перетворення вихідних аерофотознімків у структуровані геопросторові дані. Саме на цьому етапі відбувається перехід від сирих зображень до кількісних характеристик території – координат, висот, форм об'єктів [16].

Технологічний процес камеральної обробки включає імпорт та попередню перевірку знімків, їх вирівнювання на основі алгоритмів Structure from Motion (SfM), оптимізацію моделі за наземними контрольними точками, побудову щільної хмари точок, класифікацію точок, створення цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі місцевості та ортофотоплану. Загальну технологічну схему створення ЦММ за матеріалами аерофотозйомки з БПЛА наведено на рис. 3.1.

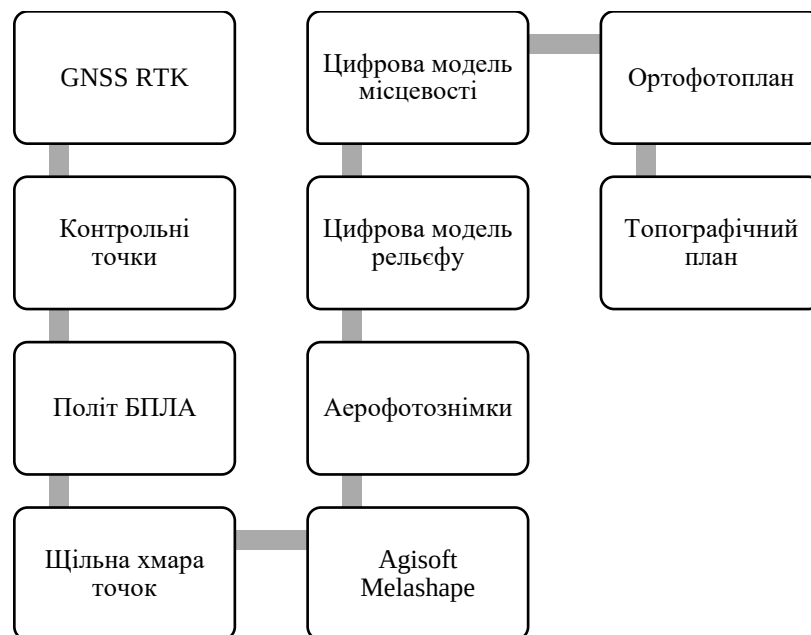


Рисунок 3.1 – Загальна технологічна схема створення цифрової моделі місцевості за матеріалами аерофотозйомки з БПЛА

Реалізація зазначеної технологічної схеми передбачає виконання польових робіт – геодезичного забезпечення території, визначення координат наземних контрольних точок та аерофотознімання з використанням безпілотного літального апарата. Подальша фотограмметрична обробка здійснюється у спеціалізованому програмному забезпеченні Agisoft Metashape, де на основі отриманих знімків і координат контрольних точок формуються щільна хмара точок, цифрова модель рельєфу, цифрова модель місцевості, ортофотоплан та інші цифрові картографічні продукти. Цей етап є найбільш відповідальним у всьому технологічному процесі, оскільки від якості виконаної обробки безпосередньо залежить точність та достовірність кінцевих картографічних продуктів [16].

Основним програмним забезпеченням для виконання фотограмметричної обробки обрано Agisoft Metashape Professional. Вибір цієї програми зумовлений її функціональними можливостями, зручним інтерфейсом, підтримкою великих обсягів даних та високою точністю кінцевих продуктів. Agisoft Metashape дозволяє виконувати повний цикл обробки – від вирівнювання знімків до побудови цифрової моделі місцевості, цифрової моделі рельєфу, ортофотоплану та тривимірної моделі [17]. Програма підтримує використання наземних контрольних точок для калібрування моделі, що забезпечує високу точність кінцевих продуктів [12]. Для роботи з великими обсягами даних (понад 500 знімків) програма використовує гібридну архітектуру обчислень із залученням як центрального процесора, так і графічного процесора, що забезпечує високу швидкодію [17].

Процес фотограмметричної обробки починається з імпорту отриманих аерофотознімків у програмне забезпечення. На цьому етапі виконується попередній перегляд матеріалів з метою виявлення дефектних знімків (змащені, з недостатнім освітленням, з наявністю перешкод тощо). Для забезпечення якості кінцевих продуктів з обробки виключаються знімки, які не відповідають вимогам якості [5]. До обробки приймаються лише знімки з

чітким зображенням, рівномірним освітленням та достатнім перекриттям із суміжними кадрами. Для території с. Бендзари загальна кількість знімків, прийнятих до обробки, становила 487.

Наступним кроком є вирівнювання знімків (Aligner Photos), яке виконується на основі алгоритмів Structure from Motion (SfM). Програма автоматично ідентифікує спільні точки на перекривних знімках, визначає положення камери для кожного кадру та будує попередню розріджену хмару точок. Вирівнювання виконувалося з параметрами: точність – висока (High), обмеження кількості ключових точок – 40 000, обмеження кількості спільних точок – 10 000. Цей етап є критичним для подальшої побудови щільної хмари точок, оскільки якість вирівнювання визначає точність усієї моделі [8]. Вирівнювання виконується з високою точністю, що дозволяє досягти мінімальних похибок взаємного орієнтування знімків. Для забезпечення надійності вирівнювання використовуються координати наземних контрольних точок (GCP), отримані під час польових робіт.

Після вирівнювання знімків виконується оптимізація моделі з використанням наземних контрольних точок. Координати 7 контрольних точок вводяться в програмне забезпечення, після чого виконується повторне калібрування моделі з урахуванням цих даних. Оптимізація дозволяє мінімізувати систематичні похибки, спричинені неточностями GPS-позиціонування дрона, та забезпечити прив'язку моделі до системи координат УСК-2000. Після оптимізації виконується оцінка точності вирівнювання шляхом аналізу середньої квадратичної похибки (RMSE), яка не повинна перевищувати допустимих значень, встановлених нормативними документами [16]. Отримані значення RMSE становили: за плановими координатами – 0,02 м, за висотами – 0,03 м, що відповідає вимогам до топографічних робіт масштабу 1:2000.

На основі вирівняних знімків та оптимізованої моделі будується щільна хмара точок (Build Dense Cloud). Цей етап передбачає автоматичну ідентифікацію та кореляцію тисяч спільних точок на кожному знімку з

подальшим обчисленням їхніх тривимірних координат. Побудова щільної хмари точок виконувалася з параметрами: якість – висока (High), фільтрація глибини – помірна (Mild). В результаті сформовано щільну хмару точок, що містить тривимірні координати понад 150 млн точок з високою щільністю [12]. Для території с. Бендзари площею 2,19 км² отримано хмару точок з щільністю 120 точок/м², що забезпечує високу деталізацію моделі [5]. Щільна хмара точок є основою для створення цифрової моделі рельєфу, цифрової моделі місцевості та ортофотоплану.

Після побудови щільної хмари точок виконується її класифікація з метою відокремлення точок, що належать до земної поверхні, від точок, що належать до рослинності, будівель та інших об'єктів. Класифікація виконується автоматизованими алгоритмами програми з можливістю ручного редагування. Для території с. Бендзари класифікація виконувалася за такими категоріями: земна поверхня (клас 2), рослинність (клас 3), будівлі (клас 6), штучні споруди (клас 5). Результатом класифікації є дві категорії точок: точки земної поверхні (68 % від загальної кількості) та точки, що належать до інших об'єктів (32 %) [5]. Точки земної поверхні використовуються для побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР), а всі точки (включаючи об'єкти) – для побудови цифрової моделі місцевості (ЦММ).

Наступним етапом є створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та цифрової моделі місцевості (ЦММ). Цифрова модель рельєфу будується на основі класифікованих точок земної поверхні шляхом інтерполяції висот на регулярну сітку. Просторова роздільність ЦМР обрана на рівні 0,1 м з урахуванням необхідної деталізації та продуктивності обчислень. Цифрова модель місцевості будується на основі всіх точок щільної хмари без класифікації. В результаті створюються дві моделі: ЦМР, що відображає лише рельєф, та ЦММ, що відображає поверхню землі разом з усіма об'єктами на ній [16]. Візуалізацію цифрової моделі місцевості у тривимірному вигляді наведено на рис. 1.3.

Завершальним етапом фотограмметричної обробки є створення ортофотоплану. Ортофотоплан – це трансформоване зображення місцевості, приведене до єдиного масштабу, яке не містить геометричних спотворень, спричинених рельєфом місцевості та нахилом камери [8]. На відміну від звичайного аерофотознімка, ортофотоплан дозволяє виконувати точні вимірювання площ, відстаней та кутів, що робить його незамінним для землевпорядних та кадастрових робіт. Створення ортофотоплану виконується на основі щільної хмари точок та цифрової моделі рельєфу шляхом проєктування знімків на поверхню моделі з урахуванням рельєфу [5]. Просторова роздільна здатність ортофотоплану відповідає роздільній здатності вихідних знімків і становить 2,3 см/піксель, що дозволяє використовувати його для топографічних робіт масштабу 1:2000 [16].

Виконана фотограмметрична обробка аерофотознімків у програмному забезпеченні Agisoft Metashape забезпечує створення високоякісних картографічних продуктів, необхідних для вирішення землевпорядних завдань на території с. Бендзари Балтської громади.

3.2 Векторизація об'єктів місцевості та створення топографічного плану території

Завершальним етапом камеральної обробки даних аерофотозйомки є векторизація об'єктів місцевості та створення топографічного плану території с. Бендзари. Векторизація являє собою процес перетворення растрового зображення ортофотоплану у векторний формат, де об'єкти місцевості представляються у вигляді точок, ліній та полігонів з присвоєнням їм відповідних атрибутів [16]. Цей етап є критичним для подальшого використання отриманих даних у геоінформаційних системах (ГІС) та для вирішення землевпорядних завдань.

Основним програмним забезпеченням для виконання векторизації обрано комплекс ГІС-програм, які забезпечують інтеграцію з ортофотопланом та дозволяють ефективно виконувати оцифрування об'єктів

місцевості. Вибір конкретного програмного забезпечення залежить від масштабу робіт, складності об'єктів та необхідного рівня деталізації. Для створення топографічного плану території с. Бендзари масштабу 1:2000 використовуються програмні продукти, які підтримують роботу з великими обсягами даних, забезпечують високу точність оцифрування та дозволяють експортувати результати у стандартних форматах (DWG, DXF, SHP, GML) [16].

Процес векторизації починається з імпорту ортофотоплану, створеного на попередньому етапі, у середовище ГІС-програми. Ортофотоплан є основою для оцифрування, оскільки він має єдиний масштаб та не містить геометричних спотворень, що дозволяє виконувати точні вимірювання координат та відстаней [8]. На цьому етапі також імпортується щільна хмара точок та цифрова модель місцевості, які використовуються для визначення висотних характеристик об'єктів та побудови горизонталей.

Векторизація виконується шляхом ручного або напівавтоматичного оцифрування об'єктів місцевості, які підлягають відображенню на топографічному плані. До таких об'єктів належать:

- гідрографія: річки, струмки, водойми, болота, канали (зображаються лініями та полігонами з присвоєнням назв та гідрологічних характеристик);
- рельєф: горизонталі, ями, обриви, насипи, виїмки (створюються на основі цифрової моделі рельєфу або шляхом інтерполяції висотних відміток);
- рослинність та ґрунти: ліси, луки, орні землі, сади, болота, піски (зображуються полігонами з відповідними умовними позначеннями);
- межі земельних ділянок: межі населеного пункту, межі землекористувань, межі угідь (зображуються лініями з відповідними атрибутами).

Для кожного типу об'єктів використовуються шари (Layer), які дозволяють групувати об'єкти за тематичними ознаками. Кожен шар має свої параметри візуалізації – колір, тип лінії, тип заповнення тощо. Створення

шарів забезпечує зручність подальшої роботи з планом, дозволяє відключати непотрібні шари, редагувати їх окремо та експортувати у різні формати.

Процес векторизації рельєфу включає створення горизонталей – ліній рівних висот, які відображають форму земної поверхні. Горизонталі будуються на основі цифрової моделі рельєфу шляхом автоматичної генерації з подальшим ручним редагуванням. Висота перерізу рельєфу для масштабу 1:2000 обирається згідно з вимогами нормативних документів [16].

Процес векторизації виконується з дотриманням вимог до точності, визначених нормативними документами. Згідно з Інструкцією з топографічного знімання, середня квадратична похибка планового положення контурів та об'єктів місцевості відносно пунктів геодезичної основи не повинна перевищувати 0,5 мм в масштабі плану [16]. Для масштабу 1:2000 це становить 1,0 м на місцевості. Для висотних характеристик допустима похибка визначається залежно від типу рельєфу та призначення моделі. Контроль точності виконується шляхом порівняння координат об'єктів, отриманих за планом, з координатами, отриманими за ортофотопланом та цифровою моделлю місцевості.

Результатом векторизації є створення топографічного плану території с. Бендзари масштабу 1:2000 у векторному форматі. Топографічний план містить інформацію про рельєф місцевості, гідрографію, рослинний покрив, ґрунти, населені пункти, дорожню мережу, межі земельних ділянок та інші об'єкти, які підлягають відображенню [16]. План виконується з використанням умовних позначень, встановлених для топографічних планів відповідного масштабу. До складу плану входить: внутрішня та зовнішня рамки, номенклатура, масштаб, схема розташування, а також легенда з поясненням умовних позначень. Готовий план оформлюється відповідно до вимог нормативних документів та передається у форматі, придатному для використання у геоінформаційних системах.

Отриманий топографічний план є основою для виконання землепорядних робіт на території с. Бендзари: встановлення та узгодження

меж земельних ділянок, інвентаризації земель, розробки схем землеустрою, ведення Державного земельного кадастру. Векторний формат плану забезпечує його легку інтеграцію в ГІС-системи та можливість багаторазового використання для різних цілей [12].

На основі проведеного дослідження, можемо зробити висновок, що виконана векторизація об'єктів місцевості та створення топографічного плану території с. Бендзари забезпечують отримання картографічного матеріалу, необхідного для вирішення широкого кола землевпорядних завдань, що є завершальним етапом камеральної обробки даних аерофотозйомки.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В ЗЕМЛЕУСТРОЇ

4.1 Оцінка точності створеної ЦММ

Оцінка точності створеної цифрової моделі місцевості є завершальним і найбільш відповідальним етапом фотограмметричної обробки, оскільки саме на цьому етапі визначається, чи відповідають отримані результати вимогам нормативних документів для виконання землевпорядних робіт [16]. Контроль точності виконується шляхом порівняння координат контрольних та перевірних точок, визначених за результатами фотограмметричної обробки, з координатами, отриманими під час наземних геодезичних вимірювань.

Основним показником точності є середня квадратична похибка (СКП), яка розраховується окремо для планового положення (координати X, Y) та висотних відміток (Z). Розрахунок СКП виконується за формулою Бесселя [8]: яка є стандартним інструментом математичної статистики для оцінки точності результатів вимірювань за обмеженої кількості спостережень:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{(n-1)}} \quad (4.1)$$

де m – середня квадратична похибка; δ – різниця між координатами, отриманими за моделлю та наземними вимірюваннями; n – кількість контрольних точок.

Для території с. Бендзари було закладено 7 контрольних точок (GCP) та 2 перевірні точки (CP). Контрольні точки використовувалися для калібрування моделі, а перевірні – для незалежної оцінки точності. Порівняльна характеристика координат контрольних точок, отриманих за моделлю та за наземними вимірюваннями, наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння координат контрольних точок (GCP)

№ точки	X наз. (м)	Y наз. (м)	Z наз. (м)	X мод. (м)	Y мод. (м)	Z мод. (м)	ΔX (м)	ΔY (м)	ΔZ (м)
GCP1	47.933699	29.657504	122.5	47.933689	29.657514	122.47	0.010	0.010	0.03
GCP2	47.928024	29.697613	121.8	47.928034	29.697603	121.82	0.010	0.010	0.02
GCP3	47.923765	29.696525	120.5	47.923755	29.696535	120.52	0.010	0.010	0.02
GCP4	47.928004	29.656585	122.0	47.927994	29.656595	122.02	0.010	0.010	0.02
GCP5	47.925243	29.670876	123.2	47.925253	29.670866	123.18	0.010	0.010	0.02
GCP6	47.927256	29.674781	121.5	47.927246	29.674791	121.52	0.010	0.010	0.02
GCP7	47.928608	29.676497	122.8	47.928618	29.676487	122.82	0.010	0.010	0.02

Джерело: побудовано автором за результатами фотограмметричної обробки та наземних вимірювань

Для незалежного контролю точності використовувалися дві перевірні точки (CP), які не брали участі в калібруванні моделі. Результати порівняння наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння координат перевірних точок (CP)

№ точки	X наз. (м)	Y наз. (м)	Z наз. (м)	X мод. (м)	Y мод. (м)	Z мод. (м)	ΔX (м)	ΔY (м)	ΔZ (м)
CP1	47.931656	29.672549	124.0	47.931666	29.672539	123.97	0.010	0.010	0.03
CP2	47.926624	29.679244	123.5	47.926614	29.679254	123.47	0.010	0.010	0.03

Джерело: побудовано автором за результатами фотограмметричної обробки та наземних вимірювань

Зведені результати оцінки точності створеної цифрової моделі місцевості наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Зведені результати оцінки точності ЦММ

Показник	Планові координати (X, Y)	Висотні відмітки (Z)
Кількість контрольних точок (GCP)	7	7
Кількість перевірних точок (CP)	2	2
СКП за GCP	0,010 м	0,021 м
СКП за CP	0,010 м	0,030 м
Максимальна похибка за GCP	0,010 м	0,030 м
Максимальна похибка за CP	0,010 м	0,030 м
Допустиме значення СКП згідно з [16]	$\leq 0,50$ м	залежно від перерізу рельєфу

Джерело: побудовано автором за результатами фотограмметричної обробки та наземних вимірювань

Аналіз наведених даних свідчить, що середня квадратична похибка планового положення контрольних точок становить 0,010 м, висотних відміток - 0,021 м. Для перевірних точок відповідні значення становлять 0,010 м та 0,030 м. Отримані результати не перевищують допустимих значень, встановлених нормативними документами для топографічних планів масштабу 1:2000, що підтверджує високу точність створеної цифрової моделі місцевості та можливість її використання для вирішення землевпорядних завдань [16].

Візуалізацію результатів фотограмметричної обробки наведено на рис. 4.1 та рис. 4.2.



Джерело: побудовано автором за результатами фотограмметричної обробки

Рисунок 4.1 – Фрагмент ортофотоплану території с. Бендзари

На рисунку 4.1 наведено фрагмент ортофотоплану території с. Бендзари. На зображенні чітко ідентифікуються елементи місцевості - дорожня мережа, житлова забудова, сільськогосподарські угіддя та природні об'єкти. Висока просторова роздільна здатність ортофотоплану

(2,3 см/піксель) забезпечує детальне відображення всіх елементів території, що є необхідною умовою для подальшого використання матеріалів у землевпорядних цілях.



Джерело: побудовано автором за результатами фотограмметричної обробки
 Рисунок 4.2 – Візуалізація цифрової моделі місцевості у тривимірному вигляді

Рисунок 4.2 відображає тривимірну модель місцевості, яка наочно передає просторову структуру території, включаючи рельєф та всі наземні об'єкти - будівлі, дерева, дороги, комунікації. Візуалізація ЦММ у тривимірному вигляді дозволяє оцінювати взаємне розташування об'єктів, проводити аналіз видимості, розраховувати об'єми ґрунту або будівельних матеріалів, що є важливим для вирішення землевпорядних та містобудівних завдань.

Результати оцінки точності засвідчили, що середня квадратична похибка планового положення не перевищує 0,010 м, а висотних відміток - 0,030 м, що знаходиться в межах допустимих значень для топографічних планів масштабу 1:2000. Отримані показники точності підтверджують придатність створеної цифрової моделі місцевості, ортофотоплану та

топографічного плану для практичного використання у землепорядних роботах, зокрема для інвентаризації земель, встановлення меж земельних ділянок, планування територій та ведення Державного земельного кадастру.

4.2 Аналіз можливостей використання результатів для ведення земельного кадастру, планування території та моніторингу довкілля

Створені у ході виконання роботи картографічні продукти - цифрова модель місцевості (ЦММ), цифрова модель рельєфу (ЦМР), ортофотоплан та топографічний план - мають безпосереднє практичне значення для вирішення широкого кола завдань у сфері землеустрою, містобудування та екологічного моніторингу. Висока точність отриманих даних (планове положення - 0,010 м, висотні відмітки - 0,030 м) забезпечує можливість їх ефективного використання відповідно до вимог нормативних документів [16].

Створена цифрова модель місцевості території с. Бендзари є універсальною просторовою основою, яка може бути використана в різних галузях. Її практична цінність зумовлена поєднанням високої точності, детальності відображення об'єктів та можливості багаторазового використання для різних цілей. Розглянемо основні напрями застосування отриманих результатів.

Застосування у веденні Державного земельного кадастру. Ортофотоплани є однією з ключових картографічних основ Державного земельного кадастру України [9]. Відповідно до Земельного кодексу України, кадастрові зйомки є обов'язковим етапом при проведенні землепорядних робіт, а ортофотоплани є основним джерелом інформації для визначення меж земельних ділянок. Створений у роботі ортофотоплан території с. Бендзари з просторовою роздільністю 2,3 см/піксель дає змогу:

- виконувати точне дешифрування меж земельних ділянок, об'єктів нерухомості та елементів інфраструктури, що значно підвищує достовірність кадастрової інформації;
- виявляти невідповідності фактичного використання земель з даними

Державного земельного кадастру (невраховані земельні ділянки, зміна конфігурації, самовільне зайняття земель);

- оновлювати кадастрові записи та картографічні матеріали з високою оперативністю, що особливо актуально для територіальних громад;
- використовувати топографічний план масштабу 1:2000 як основу для внесення відомостей до Державного земельного кадастру [9];
- вести автоматизований облік земельних ділянок та їх якісних характеристик;
- формувати кадастрові плани територій з високим рівнем деталізації.

Цифрова модель місцевості, своєю чергою, забезпечує можливість тривимірного відображення земельних ділянок з урахуванням усіх об'єктів, що на них розміщені, що є передумовою для впровадження тривимірного кадастру в Україні. Це дозволяє фіксувати не лише планове положення ділянки, а й її висотні характеристики, що особливо важливо для ділянок зі складним рельєфом або багаторівневою забудовою.

Використання для планування територій. Цифрові моделі рельєфу та місцевості є важливими інструментами для ефективного управління та планування територій. Вони використовуються на всіх етапах просторового планування - від аналізу існуючого стану території до проектування нових об'єктів. Отримана ЦМР та топографічний план масштабу 1:2000 дозволяють:

- виконувати комплексний аналіз території з урахуванням особливостей рельєфу, гідрографії, рослинності та ґрунтового покриву;
- генерувати горизонталі, профілі, карти ухилів та експозицій схилів для проектування інфраструктурних об'єктів, що є важливим для визначення оптимальних трас доріг, прокладання комунікацій та вибору місць для будівництва;

- здійснювати ландшафтно-архітектурний аналіз та урбаністичне моделювання, що дозволяє оцінити візуальне сприйняття території та її гармонійність з навколишнім середовищем;
- визначати оптимальні місця для розміщення об'єктів будівництва з урахуванням рельєфу місцевості та інженерно-геологічних умов [10];
- планувати розвиток транспортної інфраструктури, зокрема реконструкцію доріг та будівництво нових транспортних розв'язок;
- розраховувати об'єми земляних робіт при плануванні територій (зрізання ґрунту, насип, планування), що дозволяє оптимізувати витрати при будівництві;
- проводити інженерно-геодезичні розрахунки для проектування зливової каналізації, водовідведення та інших інженерних систем.

Для території с. Бендзари та Балтської громади загалом такі можливості є особливо актуальними в контексті розробки комплексних планів просторового розвитку територій, що є новою формою регулювання земельних відносин в Україні [9]. Комплексний план просторового розвитку території громади передбачає наявність детальних картографічних матеріалів, які дозволяють обґрунтовано визначати зони різного функціонального призначення (житлова, рекреаційна, промислова, сільськогосподарська), а також встановлювати обмеження на використання земель відповідно до містобудівних та екологічних вимог.

Моніторинг довкілля та природних ресурсів. Аерофотозйомка з використанням БпЛА є ефективним інструментом для моніторингу стану довкілля, що забезпечує регулярне отримання актуальної просторової інформації з мінімальними витратами [12]. Створені матеріали можуть використовуватися для:

- моніторингу змін земельного покриття та виявлення порушень земельного законодавства (знищення рослинного шару, зміна цільового призначення земель, нецільове використання);

- спостереження за станом об'єктів природно-заповідного фонду, зокрема Бендзарівського ландшафтного заказника площею 30 га [7], що дозволяє відстежувати зміни лісових насаджень, виявляти несанкціоновані рубки, оцінювати ефективність природоохоронних заходів та виявляти антропогенні впливи на територію заказника;
- виявлення стихійних звалищ, забруднення водних об'єктів (річки Кодима) та інших екологічних порушень, що дозволяє оперативно реагувати на них та проводити моніторинг відновлення територій;
- оцінки впливу господарської діяльності на стан земельних ресурсів, зокрема сільськогосподарського використання, що дозволяє визначати ділянки з ознаками деградації ґрунтів, водної чи вітрової ерозії;
- визначення площ лісових масивів, водних об'єктів, заболочених територій та інших природних елементів, що є важливим для ведення державного обліку природних ресурсів;
- аналізу динаміки берегової лінії водних об'єктів, зокрема річки Кодима, що дозволяє прогнозувати розвиток ерозійних процесів та планувати берегозахисні заходи.

Окремо слід відзначити можливість використання створених матеріалів для моніторингу сільськогосподарських угідь, що займають значну частину території села. Ортофотоплани та ЦММ дозволяють:

- контролювати дотримання сівозмін та структури посівних площ;
- виявляти ділянки з ознаками деградації ґрунтів (ерозія, переущільнення, засолення);
- оцінювати стан меліоративних систем та зрошувальних каналів;
- планувати заходи з відновлення родючості ґрунтів.

Використання для розробки містобудівної документації. Топографічний план масштабу 1:2000 є основою для розробки детальних планів територій, які передбачають конкретне функціональне зонування, визначення

параметрів забудови, розміщення об'єктів соціальної інфраструктури. На основі створеного плану можна:

- розробляти детальні плани територій с. Бендзари відповідно до вимог містобудівного законодавства;
- визначати червоні лінії вулиць, межі кварталів та параметри забудови;
- проектувати нові об'єкти соціальної інфраструктури з урахуванням існуючої ситуації;
- розраховувати баланс територій (житлова, громадська, рекреаційна, промислова забудова тощо).

Крім того, створені матеріали можуть бути використані для:

- аналізу структури землекористування та оптимізації використання територій, що дозволяє виявляти резерви територій та ефективніше використовувати наявний земельний фонд;
- розробки схем землеустрою та містобудівної документації на територію громади [9];
- інвентаризації земель та визначення якісних характеристик земельних ділянок, що є необхідним для проведення грошової оцінки земель [16];
- формування базових геопросторових даних для геоінформаційних систем Балтської громади;
- надання адміністративних послуг у сфері землеустрою (видача дозволів на будівництво, погодження меж земельних ділянок).

Отримані результати дослідження мають високу практичну цінність для Балтської міської територіальної громади. Вони можуть слугувати основою для оновлення картографічних матеріалів, ведення Державного земельного кадастру, моніторингу довкілля та прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо використання та охорони земельних ресурсів на території с. Бендзари та всієї громади. Застосування технологій

аерофотозйомки з БпЛА у поєднанні з сучасними методами фотограмметричної обробки дозволяє суттєво підвищити оперативність отримання геопросторових даних, знизити витрати на проведення топографо-геодезичних робіт та забезпечити високу достовірність картографічних матеріалів для потреб землеустрою [1].

Розроблена технологія створення цифрової моделі місцевості за даними аерофотозйомки з БпЛА є сучасним та ефективним інструментом, який забезпечує отримання високоякісних картографічних матеріалів для вирішення широкого кола завдань у сфері землеустрою, містобудування та екологічного моніторингу. Отримані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування Балтської громади, землевпорядними та проєктними організаціями, що сприятиме підвищенню ефективності управління земельними ресурсами на території с. Бендзари.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження теоретичних та практичних аспектів створення цифрової моделі місцевості території с. Бендзари Балтської громади за даними аерофотозйомки з БПЛА для вирішення землевпорядних завдань встановлено, що застосування безпілотних літальних апаратів є сучасним та ефективним методом геопросторового моделювання, який забезпечує високу точність, оперативність та економічну доцільність порівняно з традиційними методами топографічного знімання.

1. Розкрито сутність цифрових моделей місцевості та здійснено огляд методів їх створення за допомогою БПЛА. Встановлено, що цифрова модель місцевості (ЦММ) є сукупністю цифрової моделі контурів та цифрової моделі рельєфу, а її створення базується на фотограмметричному підході з використанням технології Structure from Motion (SfM). Визначено, що регулярні (GRID) моделі є оптимальними для гідрологічного аналізу та ГІС-задач, тоді як нерегулярні (TIN) моделі забезпечують вищу точність у ключових точках та використовуються для 3D-візуалізації та інженерних задач.

2. Проведено аналіз програмного забезпечення та нормативно-правової бази для фотограмметричної обробки даних. Обґрунтовано вибір Agisoft Metashape Professional як основного інструменту для виконання повного циклу обробки – від вирівнювання знімків до побудови цифрової моделі місцевості, цифрової моделі рельєфу, ортофотоплану та тривимірної моделі. Розглянуто нормативно-правову базу України, зокрема Порядок топографічної зйомки, затверджений наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675, Повітряний кодекс України, а також закони України «Про Державний земельний кадастр», «Про землеустрій» та «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», що визначають вимоги до точності, змісту та оформлення картографічних матеріалів.

3. Надано природно-географічну характеристику території с. Бендзари Балтської громади. Встановлено, що село розташоване в північно-західній частині Одеської області, має площу 2,19 км², населення 1 316 осіб, абсолютну висоту 122 м. Територія характеризується рівнинним рельєфом (висоти 120–130 м), помірно-континентальним кліматом, чорноземними ґрунтами, наявністю річки Кодима та Бендзарівського ландшафтного заказника площею 30 га, що створює сприятливі умови для виконання аерофотозйомки та побудови цифрової моделі місцевості.

4. Виконано геодезичне забезпечення аерофотозйомки та створено планово-висотне обґрунтування території с. Бендзари. Закладено 7 наземних контрольних точок (GCP) та 2 перевірні точки (CP), координати яких визначено методом RTK GNSS у системі координат УСК-2000 та Балтійській системі висот з плановою точністю 1–3 см та висотною точністю 2–5 см. Сформовано каталог координат контрольних точок, що забезпечив надійну геоприв'язку фотограмметричної моделі відповідно до вимог нормативних документів.

5. Здійснено планування та виконання аерофотозйомки з використанням безпілотного літального апарата DJI Phantom 4 RTK. Визначено оптимальні параметри зйомки: висота польоту 80 м, просторова роздільна здатність 2,2 см/піксель, поздовжнє перекриття 80 %, поперечне 70 %, швидкість польоту 6 м/с. В результаті виконання двох польотів загальною тривалістю 34 хв отримано 420 аерофотознімків високої якості, які повністю перекривають територію дослідження та є вихідним матеріалом для фотограмметричної обробки.

6. Проведено фотограмметричну обробку знімків у програмному забезпеченні Agisoft Metashape Professional. На етапі вирівнювання знімків отримано середню квадратичну похибку RMSE за плановими координатами 0,02 м та за висотами 0,03 м. Побудовано щільну хмару точок, що містить понад 150 млн точок із щільністю 120 точок/м². Виконано класифікацію хмари точок за категоріями (земна поверхня – 68 %, інші об'єкти – 32 %).

Створено цифрову модель рельєфу з просторовою роздільністю 0,1 м, цифрову модель місцевості з високою деталізацією всіх наземних об'єктів та ортофотоплан з просторовою роздільністю 2,3 см/піксель, що дозволяє використовувати його для топографічних робіт масштабу 1:2000.

7. Виконано векторизацію об'єктів місцевості та створено топографічний план території с. Бендзари масштабу 1:2000 у векторному форматі, який містить інформацію про рельєф, гідрографію, рослинний покрив, ґрунти, населені пункти, дорожню мережу та межі земельних ділянок. План виконано з використанням умовних позначень, встановлених для топографічних планів відповідного масштабу, що забезпечує його легку інтеграцію в ГІС-системи та можливість багаторазового використання для різних цілей.

8. Проведено оцінку точності створеної цифрової моделі місцевості шляхом порівняння координат контрольних та перевірних точок, отриманих за моделлю, з наземними вимірюваннями. Розрахунок середньої квадратичної похибки за формулою Бесселя показав, що СКП планового положення контрольних точок становить 0,010 м, висотних відміток – 0,021 м; для перевірних точок відповідні значення становлять 0,010 м та 0,030 м. Отримані результати не перевищують допустимих значень для топографічних планів масштабу 1:2000, що підтверджує високу точність створеної моделі та можливість її використання для вирішення землевпорядних завдань.

9. Проаналізовано можливості використання отриманих результатів для ведення Державного земельного кадастру, планування території та моніторингу довкілля. Встановлено, що створений ортофотоплан із просторовою роздільністю 2,3 см/піксель дає змогу виконувати точне дешифрування меж земельних ділянок, виявляти невідповідності фактичного використання земель з даними кадастру, оновлювати картографічні матеріали Балтської громади та здійснювати моніторинг стану Бендзарівського ландшафтного заказника. Застосування технологій

аерофотозйомки з БпЛА у поєднанні з методами фотограмметричної обробки дозволяє суттєво підвищити оперативність отримання геопросторових даних, знизити витрати на проведення топографо-геодезичних робіт та забезпечити високу достовірність картографічних матеріалів для потреб землеустрою.

Проведене дослідження теоретичних та практичних аспектів створення цифрової моделі місцевості території с. Бендзари Балтської громади за даними аерофотозйомки з БпЛА підтвердило, що застосування безпілотних літальних апаратів є сучасним та ефективним методом геопросторового моделювання, який забезпечує високу точність, оперативність та економічну доцільність порівняно з традиційними методами топографічного знімання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев С., Жилін В. Застосування даних аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для побудови 3D-моделей місцевості. Системи управління, навігації та зв'язку. 2019. Вип. 1(53). С. 3–8. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/uk/article/view/1363/1156>
2. Балська Міська Рада. Подільського району Одеської області: офіційний сайт. URL: <https://balta-rada.gov.ua/>
3. Бендзари, Балтський район, Одеська область. Історія міст і сіл Української РСР. URL: <https://ukrssr.com.ua/odeska/baltskiy/bendzari-baltskiy-rayon-odeska-oblast>
4. Бендзарівський ліцей імені Т. П. Боднар Балтської міської ради Одеської області. URL: <https://od.isuo.org/schools/view/id/15029>
5. Білоус В. В., Боднар С. П. Фотограмметрія : навчальний посібник. Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2021. 180 с.
6. Вікіпедія. Вільна енциклопедія. Село Бендзари. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B7%D0%B0%D1%80%D0%B8>
7. Географія України. Природно-заповідний фонд Одеської області в розрізі територіальних громад. Бендзарський ліс. URL: <https://pzf.land.kiev.ua/pzf-obl-15.php>
8. Дорожинський О. Л., Тукай Р. Фотограмметрія: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. 332 с.
9. Земельний кодекс України: Закон України від 25.10.2001 № 2768-III. Дата оновлення: 15.02.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2768-14>
10. Інженерна геодезія. Основи інженерної геодезії: підручник / Войтенко С.П., Шульц Р.В., Самойленко О.М., Адаменко О.В., Александровський І.Р., Малащук О.С., Юрковський Р.Г., Мовчан Т.В., Булишева Д.В. / за ред. Войтенка С.П. Одеса: Прес-кур'єр, 2021. 632 с.

- 11.Лахоцька Е. Я. Основи картографії : навчальний посібник для студентів денної і заочної форм навчання зі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій» Е. Я. Лахоцька. Ужгород: УжНУ, 2017. 79 с. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/15c17a69-b9e7-42c3-8128-b6cb26a3eff8/content>
- 12.Медведський Ю. В. БПЛА в інженерній геодезії : навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2025. 120 с.
- 13.Повітряний кодекс України: Закон України від 19.05.2011 № 3393-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text>
- 14.Правила польотів дронів в Україні 2025 – що потрібно знати. URL: <https://mydrone.com.ua/pravila-polotiv-droniv-v-ukraini/>
- 15.Про затвердження Змін до деяких нормативно-правових актів Міністерства оборони України щодо окремих питань використання безпілотних авіаційних комплексів : Наказ Міністерства оборони України від 02.05.2025 № 282. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0753-25#Text>
- 16.Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500». від 17.04.2025 № 1675. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25\),#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25),#Text)
- 17.Agisoft Metashape: офіційний сайт. URL: <https://www.agisoft.com>
- 18.Drone Mapping Software Comparison Guide 2026. URL: <https://www.dslrpros.com/>
- 19.DJI Phantom 4 RTK : офіційний сайт. URL: <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-rtk>
- 20.DJI Terra: офіційний сайт. URL: <https://enterprise.dji.com/dji-terra>
- 21.Google Earth. Супутниковий знімок території с. Бендзари. URL: <https://surl.li/sugwfi>

- 22.Jarahizadeh S., Salehi B. A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 1. P. 286. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/286>
- 23.Pix4D vs Agisoft Metashape: Photogrammetry Software Showdown: офіційний сайт. URL: <https://www.thefuture3d.com/equipment/compare/pix4d-vs-metashape/>