

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ТА УПРАВЛІННЯ ТЕРИТОРІЯМИ**

Кафедра Інженерної геодезії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

на тему:

Розрахунок об'ємів земляних робіт

Євенка Гордія Володимировича

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ТА УПРАВЛІННЯ ТЕРИТОРІЯМИ**

Кафедра Інженерної геодезії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІГ

Дем'яненко Р.А.

“ ___ ” _____ 20__ року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

Розрахунок об'ємів земляних робіт

Виконав студент групи ГД-21

Спеціальність: **193 «Геодезія та землеустрій»**

Спеціалізація: **193.01 «Геодезія»**

Євенко Гордій Володимирович

Керівник: Медведський Ю.В.

доцент, кандидат технічних наук

Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: **Геоінформаційних систем та управління територіями**

Кафедра: **Інженерної геодезії**

Освітній рівень: **бакалавр за освітньо-професійною програмою**

Спеціальність: **193 «Геодезія та землеустрій»**

Спеціалізація: **193.01 «Геодезія»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІГ

Дем'яненко Р.А.

“ ___ ” _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

Євенка Гордія Володимировича

1. Тема роботи «Розрахунок об'єму земляних робіт» затверджена наказом ректора КНУБА № 565/22/25 від 09.05.2025 року на теми бакалаврських робіт для ОП «Геодезія»
2. Керівник роботи: Медведський Ю.В., доцент, к.т.н
(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання студентом роботи до захисту: _____
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
 - Р. 1. Нормативно-правове забезпечення
 - Р. 2. Геодезичне забезпечення робіт
 - Р. 3. Витрати на геодезичне забезпечення та техніка безпеки
5. Графічний матеріал за розділами:
 - Р. 1. Загальна характеристика об'єкту
 - Р. 2. Визначення необхідної точності виконання геодезичних робіт

Р. 3. Планово-висотна опорна геодезична мережа

Р. 4. Методика виконання робіт

Р. 5. 3D модель насипу

Р. 6. Розрахунки об'ємів земляних робіт

6. Календарний план виконання роботи: а) наукова частина;
б) практична частина.

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Вступ	25.04,2025
Розділ 1. Нормативно-правове забезпечення	03.05,2025
Розділ 2. Геодезичне забезпечення робіт	20.05,2025
Розділ 3. Витрати на геодезичне забезпечення та техніка безпеки	28.05,2025
Висновки	02.06.2025
Остаточне оформлення роботи	04,06,2025
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	06.06.2025
Попередній захист роботи на кафедрі	13.06.2025

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.			
Розділ 5.			

8. Дата видачі завдання: _____

Зав. кафедри ІГ

(підпис)

Дем'яненко Р.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Медведський Ю.В.

(прізвище та ініціали)

Студент

(підпис)

Євченко Г.В.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Розділ 1. Нормативно-правове забезпечення.....	7
1.1. Коротка характеристика об'єкту.....	7
1.2. Аналіз існуючих методів розрахунку об'ємів земляних робіт.....	9
1.3. Перелік законодавчих та нормативних документів, якими керуються при виконанні робіт.....	12
1.4. Вимоги до точності виконання робіт.....	18
Розділ 2. Геодезичне забезпечення робіт.....	19
2.1. Загальні відомості про моделювання фотограмметричним методом.....	19
2.2. Геодезичні роботи при створенні планово-висотної основи.....	34
2.3. Розрахунок точності та вибір обладнання.....	40
2.4. Створення 3Д моделі.....	43
2.5. Обрахунок об'ємів насипу.....	51
Розділ 3. Витрати на геодезичне забезпечення.....	58
3.1. Організація геодезичних робіт.....	58
3.2. Кошторис на виконання робіт.....	59
3.3. Техніка безпеки.....	60
Висновок.....	64
Список використаних джерел.....	65

ВСТУП

У сфері будівництва, землеустрою та промислового виробництва важливим етапом інженерно-геодезичного забезпечення є визначення об'ємів земляних мас. Від точності цих розрахунків залежить не лише ефективність планування робіт, але й обґрунтованість витрат, організація перевезення ґрунту, а також технічний і фінансовий контроль реалізації проєктів.

На сучасному етапі розвитку геодезії активно впроваджуються цифрові технології, що значно розширюють можливості вимірювань. Зокрема, безпілотні літальні апарати (далі – БПЛА) у поєднанні з фотограмметричними методами дозволяють оперативно отримувати просторові моделі місцевості високої деталізації. Застосування глобальних навігаційних супутникових систем (далі – ГНСС) для визначення координат та висот опорних точок забезпечує точну просторову прив'язку отриманих даних.

Незважаючи на очевидні переваги таких технологій, в Україні наразі відсутні офіційно затверджені нормативно-правові документи, які б встановлювали вимоги до точності обчислення об'ємів земляних мас із використанням БПЛА та фотограмметрії. У зв'язку з цим фахівці змушені орієнтуватися на досвід інших країн, технічні характеристики обладнання та вимоги конкретних замовників.

Метою цієї роботи є дослідження та практичне застосування сучасних геодезичних методів для розрахунку об'єму насипу. У процесі роботи передбачається виконання аерофотознімання за допомогою БПЛА, визначення планового та висотного положення контрольних точок методом GNSS-спостережень, побудова цифрової моделі рельєфу та визначення об'єму шляхом фотограмметричного аналізу.

РОЗДІЛ 1. НОРМАТИВНО ПРАВОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1. Коротка характеристика об'єкту

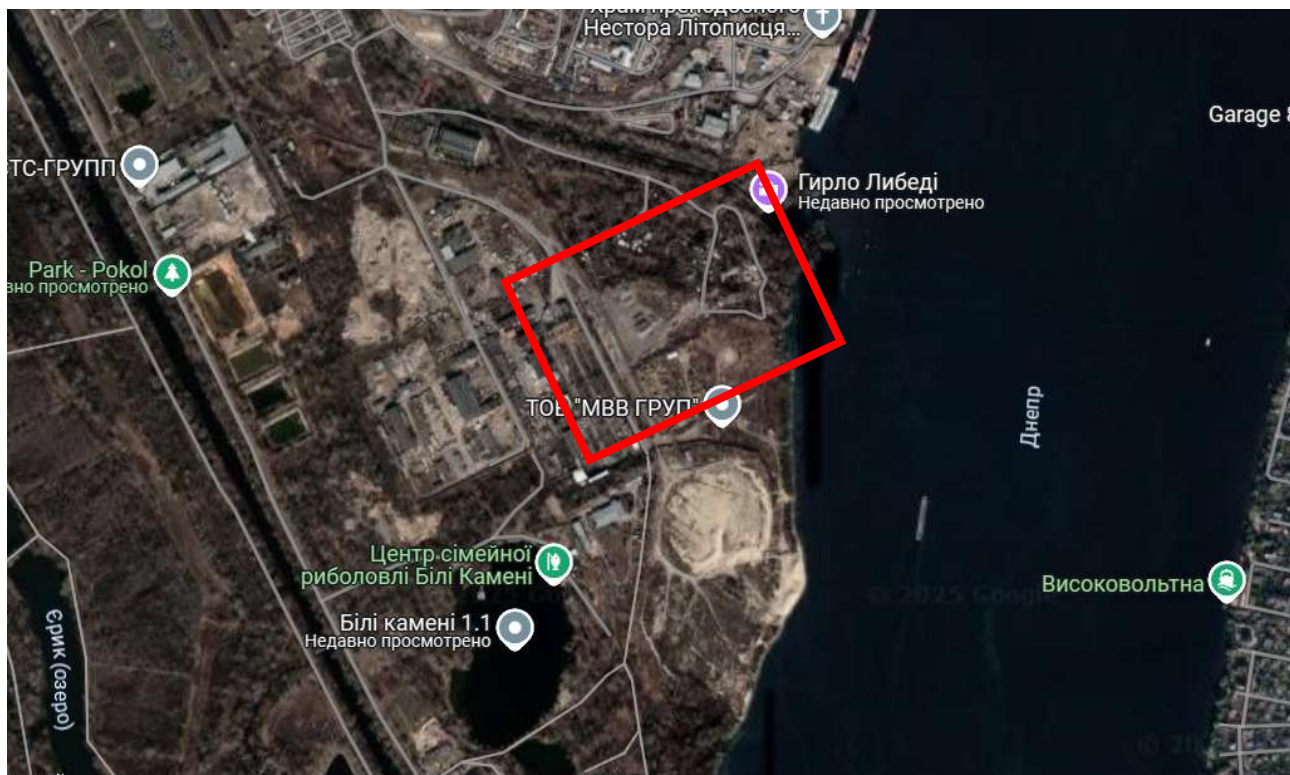


Рис. 1.1. Місце розташування ділянки

Об'єктом дослідження є група техногенних насипів, розташованих на території промислової зони в межах міста Київ, у безпосередній близькості до річки Дніпро, поблизу історичної місцевості «Корчувате». Територія має змішане промислово-складське використання та включає елементи незабудованого ґрунтового ландшафту.



Рис. 1.2. Об'єкт дослідження

Насипи утворені в результаті діяльності підприємств, що розташовані в околицях, і мають висоту до 5 метрів відносно прилеглої території. Поверхня насипів частково вкрита рослинністю, місцями спостерігається ерозія та незначна деформація схилів. Матеріал насипів - щебінь (гранітний або вапняковий), пісок будівельний, промислові відходи (зола, шлак, подрібнений бетон).

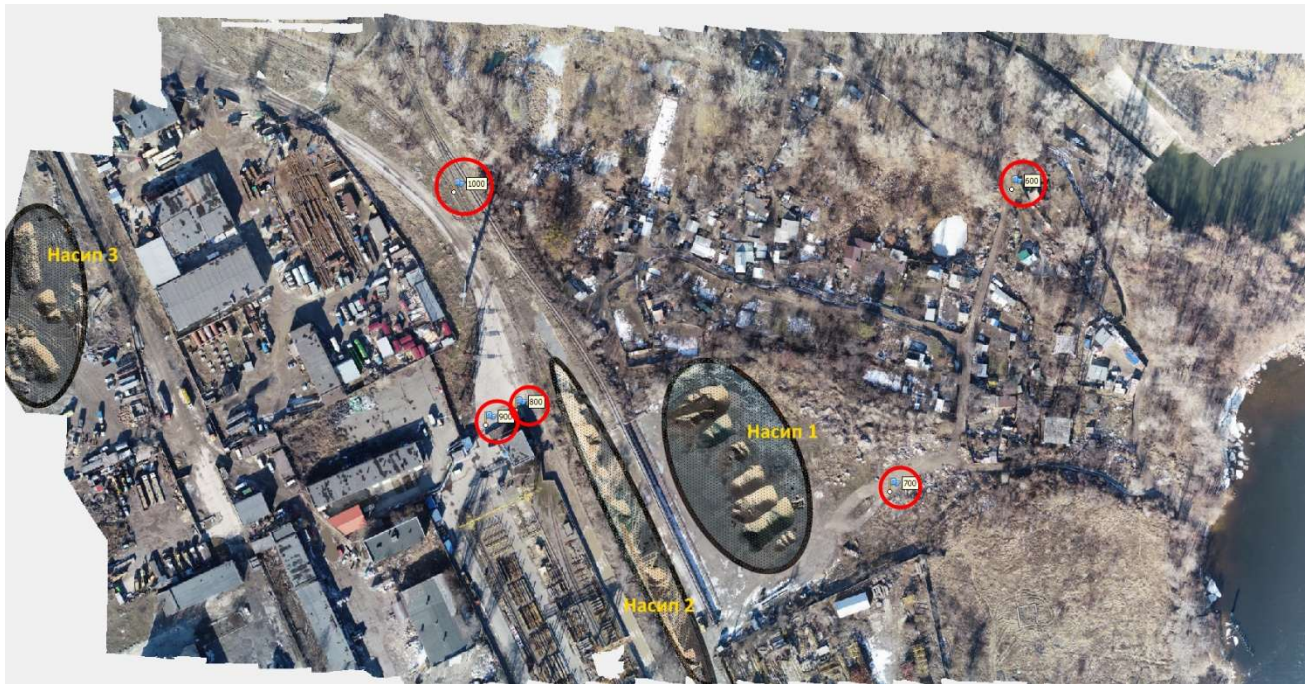


Рис. 1.3. Місце розташування об'єктів дослідження на ділянці

Площа обстежуваної ділянки становить приблизно 5–7 гектарів, що забезпечує достатню кількість ортофотоматеріалу для детального аналізу. Ділянка має складну мікрорельєфну структуру з локальними перепадами висот, що робить її ідеальною для застосування фотограмметричних методів аналізу об'ємів.

1.2. Аналіз існуючих методів розрахунку об'ємів земляних робіт

У сучасній геодезичній практиці застосовується кілька основних методів визначення об'ємів земляних мас, вибір яких залежить від характеру рельєфу, масштабу робіт, доступності території та вимог до точності результатів. Розглянемо ключові з них:

1. Метод призми

Цей метод передбачає поділ досліджуваної площі на ряд прямокутних або трапецеїдальних призм. Кожна призма розглядається як умовна геометрична фігура з відомими розмірами, що дозволяє обчислити її об'єм за елементарними формулами. Сума об'ємів усіх окремих призм дає загальний результат.



Рис. 1.4. Визначення об'ємів земляних робіт за допомогою методу призми

Сфера застосування: найчастіше використовується при проектуванні на рівнинній місцевості, коли рельєф має незначні варіації. Метод зручний для попередніх розрахунків на сільськогосподарських угіддях або при підготовці будівельного майданчика.

2. Метод контурів

Метод базується на аналізі карт з нанесеними горизонталями — лініями однакової висоти. Визначення об'єму здійснюється шляхом обчислення площ між суміжними горизонталями та помноженням їх на висотний інтервал. Результати підсумовуються для отримання загального об'єму.

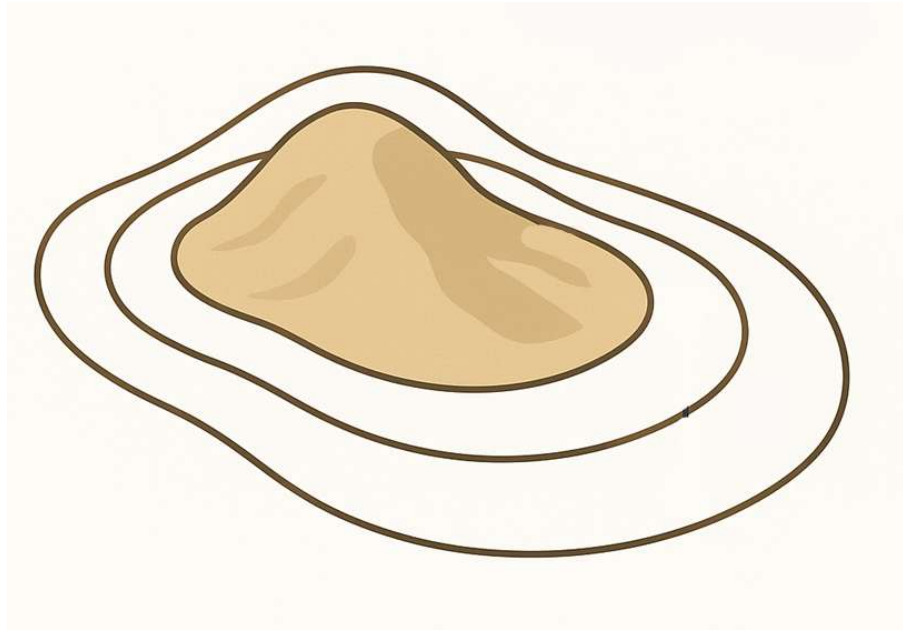


Рис. 1.5. Визначення об'ємів земляних робіт за допомогою методу контурів

Типові задачі: метод добре працює на складному рельєфі, де важливо враховувати перепади висот, наприклад, у гірських районах або на об'єктах гідротехнічного будівництва. Його також застосовують для аналізу територій, де вже наявні топографічні карти.

3. Метод фотограмметрії.

Фотограмметрія є одним із найсучасніших та високотехнологічних способів визначення об'ємів земляних робіт. Метод передбачає використання аерофотознімків або зображень, отриманих з БПЛА, для побудови цифрових моделей місцевості — таких як цифрова модель поверхні (DSM) та цифрова модель рельєфу (DTM). Порівнюючи моделі "до" та "після" виконання робіт, можна з високою точністю визначити обсяги переміщеного ґрунту.



Рис. 1.6. Визначення об'ємів земляних робіт за допомогою БПЛА та фотограмметричного методу

Переваги методу:

- Надзвичайно висока деталізація та точність;
- Можливість оперативного збору даних з великих і важкодоступних ділянок;
- Швидкість обробки та візуалізації результатів за допомогою спеціалізованого ПЗ (Agisoft Metashape, Pix4D, RealityCapture тощо);
- Відсутність необхідності прямого контакту з територією — особливо актуально для ділянок з обмеженим доступом або складним рельєфом.

Практичне значення: фотограмметричний метод ідеально підходить для інженерно-геодезичних вишукувань на масштабних об'єктах (кар'єри, дамби, полігони, великі насипи), а також для моніторингу змін рельєфу у динаміці.

4. Лазерне сканування

Лазерне сканування використовується для отримання точних 3D-даних про місцевість за допомогою лазерних сканерів, що вимірюють відстані до різних точок на місцевості та створюють тривимірні моделі. Цей метод дозволяє створювати детальні цифрові моделі поверхні з високою точністю.

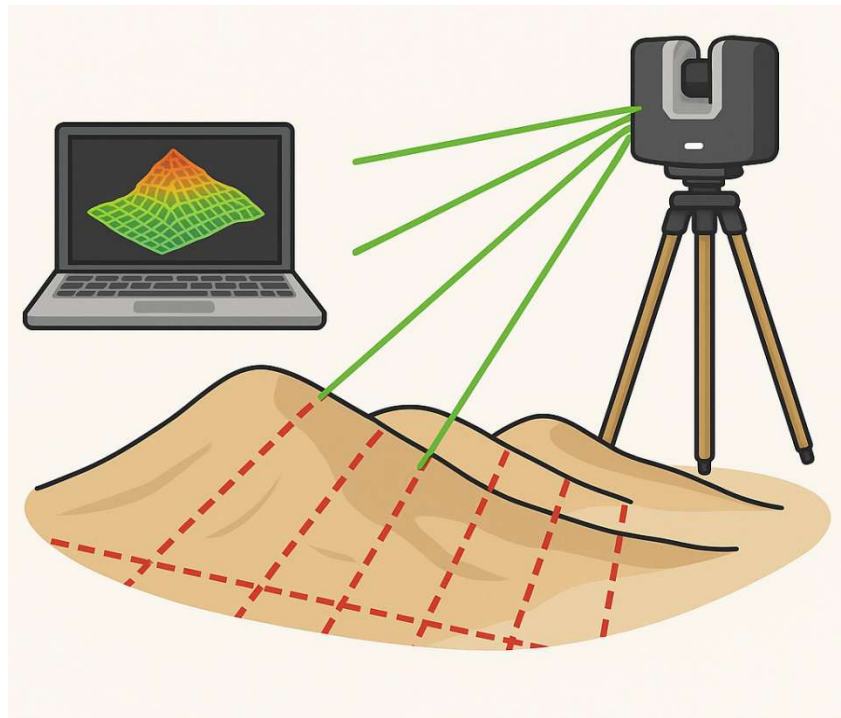


Рис. 1.7. Визначення об'ємів земляних робіт за допомогою лазерного сканера.

Доцільність використання: лазерне сканування застосовують для складних територій, де потрібно отримати надзвичайно точні дані, наприклад, для об'єктів з великими перепадами висот або при розробці складних інженерних споруд. Однак цей метод є більш затратним у порівнянні з іншими, що обмежує його застосування на великих територіях.

1.3. Перелік законодавчих та нормативних документів, якими керуються при виконанні робіт.

На сьогодні в Україні відсутні чітко визначені нормативні документи, які б регламентували порядок виконання розрахунків об'ємів земляних мас на основі даних, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів та фотограмметричних методів.

Незважаючи на відсутність спеціалізованих нормативних актів, виконання цієї роботи буде керуватись чинними нормативними документами, що стосуються організації геодезичних вимірювань, використання навігаційних систем, точності побудов, а також правил здійснення топографічного знімання.

Ці документи дозволяють забезпечити високий рівень точності результатів, а також дотримання стандартів геодезичних та топографічних робіт.

1. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» Визначає правові та організаційні засади здійснення геодезичної діяльності в Україні, зокрема, регламентує порядок виконання геодезичних вимірювань, обробки та зберігання просторових даних, а також встановлює вимоги до точності результатів.

2. ДБН В.1.3-2:2010 "Геодезичні роботи у будівництві".

Регламентує порядок виконання геодезичного забезпечення будівельного виробництва, у тому числі вимоги до точності визначення координат, порядок створення планово-висотної основи, та правила фіксації просторових змін.

3. ГКНТА 2.04-02-98 «Інструкція з топографічного знімання масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000 і 1:500».

Цей документ містить рекомендації щодо знімання рельєфу та об'єктів місцевості, побудови горизонталей, точності визначення висот, а також вимоги до обробки результатів знімання — зокрема, до побудови цифрових моделей рельєфу.

4. ДСТУ ISO 17123-8:2018 «Оптичні та електронні прилади для вимірювань у польових умовах. Частина 8: GNSS-прилади»

Регламентує порядок проведення польових вимірювань із використанням супутникових технологій, зокрема в RTK та PPK режимах, та встановлює допустимі межі похибок у залежності від класу точності робіт.

5. Тимчасовий порядок використання повітряного простору України, 31.05.2018

Визначає тимчасовий порядок використання повітряного простору України, у тому числі умови використання безпілотних літальних апаратів. Згідно з документом, виконання польотів з метою аерофотознімання можливе лише за погодженням з відповідними органами управління повітряним рухом.

У мирний час основними нормативними документами, які регламентують використання повітряного простору є:

- Повітряний кодекс України;
- Положення про використання повітряного простору України;
- Правила використання повітряного простору України.

Організація повітряного простору

Повітряний простір України та повітряний простір над відкритим морем, де відповідальність за обслуговування повітряного руху міжнародними договорами покладена на Україну, визначається та встановлюється відповідно до стандартів та рекомендованої практики ІКАО, документів ЄВРОКОНТРОЛЮ, Повітряного Кодексу України, Положення про використання повітряного простору України та складається з таких структурних елементів:

- 1 верхній район польотної інформації (UIR KYIV);
- 5 районів польотної інформації (FIR Дніпропетровськ, FIR Київ, FIR Львів, FIR Одеса, FIR Сімферополь);
- диспетчерські райони та зони (UTA, СТА, ТМА, СТР), в яких надається обслуговування повітряного руху органами ОПР;
- військові ТМА, СТР, в яких здійснюється управління повітряним рухом відомчими органами УПР;
- аеродромні зони польотної інформації (AFIZ) – встановлюються для надання польотно-інформаційного та аварійного обслуговування на аеродромах AFIS;
- зони аеродромного руху (ATZ) – встановлюються, як правило, для кожного ЗПМ;
- маршрути ОПР, у тому числі спеціально виділені маршрути для перетинання державного кордону;
- повітряний простір вільних маршрутів (FRA);
- заборонені зони (P), зони обмеження польотів (R), небезпечні зони (D), які встановлюються в районах, де польоти повітряних суден заборонено або обмежено;
- учбові та тренувальні зони (T), які мають статус тимчасово відокремлених районів (TSA) або тимчасово зарезервованих районів (TRA);

- зони з особливим режимом використання повітряного простору, які встановлено вздовж державного кордону та навколо заборонених зон.[11]

Порядок використання повітряного простору безпілотними повітряними суднами.

Відповідно до вимог пункту 4 розділу II Правил використання повітряного простору, польоти безпілотних повітряних суден масою до 20 кг включно виконуються без подання заявок на використання повітряного простору, без отримання дозволів на використання повітряного простору, без інформування органів управління Повітряних Сил Збройних Сил України та органів об'єднаної цивільно-військової системи організації повітряного руху України (ОЦВС), органів Державної прикордонної служби України, органів обслуговування повітряного руху (ОПР) та відомчих органів управління повітряним рухом (УПР), за умови дотримання таких вимог:

1. Польоти виконуються без перетинання державного кордону України;
2. Польоти виконуються поза межами встановлених заборон та обмежень використання повітряного простору, крім випадків, установлених Положенням про використання повітряного простору;
3. Польоти виконуються не ближче 5 км від зовнішніх меж злітно-посадкових смуг аеродромів або не ближче 3 км від зовнішніх меж злітно-посадкової смуги ЗПМ/вертодромів, крім випадків узгодження з експлуатантом аеродрому/ЗПМ/вертодрому;
4. Польоти виконуються не ближче 500 м від пілотованих повітряних суден;
5. Польоти не виконуються над: скупченням людей на відкритому просторі та над місцями щільної забудови; об'єктами (зонами), які визначені Міністерством оборони України, Міністерством інфраструктури України, Міністерством внутрішніх справ України, Державною прикордонною службою України, Службою безпеки України, Національною поліцією України, Національною гвардією України, Державною фіскальною службою України, Службою зовнішньої розвідки України, Управлінням державної охорони України, іншими військовими формуваннями та правоохоронними структурами, утвореними

відповідно до законів України, та відносно яких здійснюється охорона / державна охорона (за умови позначення території навколо цих об'єктів інформаційними знаками про заборону польотів безпілотних повітряних суден та/або шляхом оприлюднення меж такої заборони), крім випадків виконання польотів за дозволом зазначених вище повноважних органів;

6. Польоти виконуються в межах прямої видимості (VLOS);

7. Максимальна висота польоту не вище: 120 м над рівнем земної (водної) поверхні поза межами CTR, AFIZ, ATCA, ATCZ, спеціально встановлених зон, іншого спеціально зарезервованого повітряного простору

- 50 м над рівнем земної (водної) поверхні в межах CTR, AFIZ, ATCA, ATCZ, спеціально встановлених зон, іншого спеціально зарезервованого повітряного простору, якщо інформація про фактичний статус елементів структури повітряного простору на час виконання польоту відсутня;

- 50 м над статичними перешкодами на горизонтальній відстані не більше 100 м від таких перешкод, як відхилення від зазначених вище обмежень по висоті, на запит власника такого об'єкту;

8. Швидкість польоту безпілотного повітряного судна складає не більше 160 км/год.

В інших випадках польоти безпілотного повітряного судна масою до 20 кг включно та усі без винятку польоти безпілотного повітряного судна масою більше 20 кг виконуються у межах спеціально встановлених зон та маршрутів з дотриманням вимог щодо подання заявок на використання повітряного простору, отримання дозволів та умов використання повітряного простору, інформування органів управління Повітряних Сил Збройних Сил України, органів Державної прикордонної служби України, органів ОЦВС, органів ОПР/УПР. [11]

Карта заборонених зон та обмежень використання повітряного простору України

Відповідно до Правил використання повітряного простору, територія повітряного простору України обмежується зонами заборон на виконання

польотів цивільними особами, зокрема за допомогою БПЛА. Для зручності розроблена Карта зон заборон і обмежень використання повітряного простору України, яка доступна на офіційному сайті Державної авіаційної служби України. Ця карта відображає актуальні дані про зони, де польоти БПЛА заборонені або обмежені, що дозволяє планувати польоти з урахуванням чинних обмежень

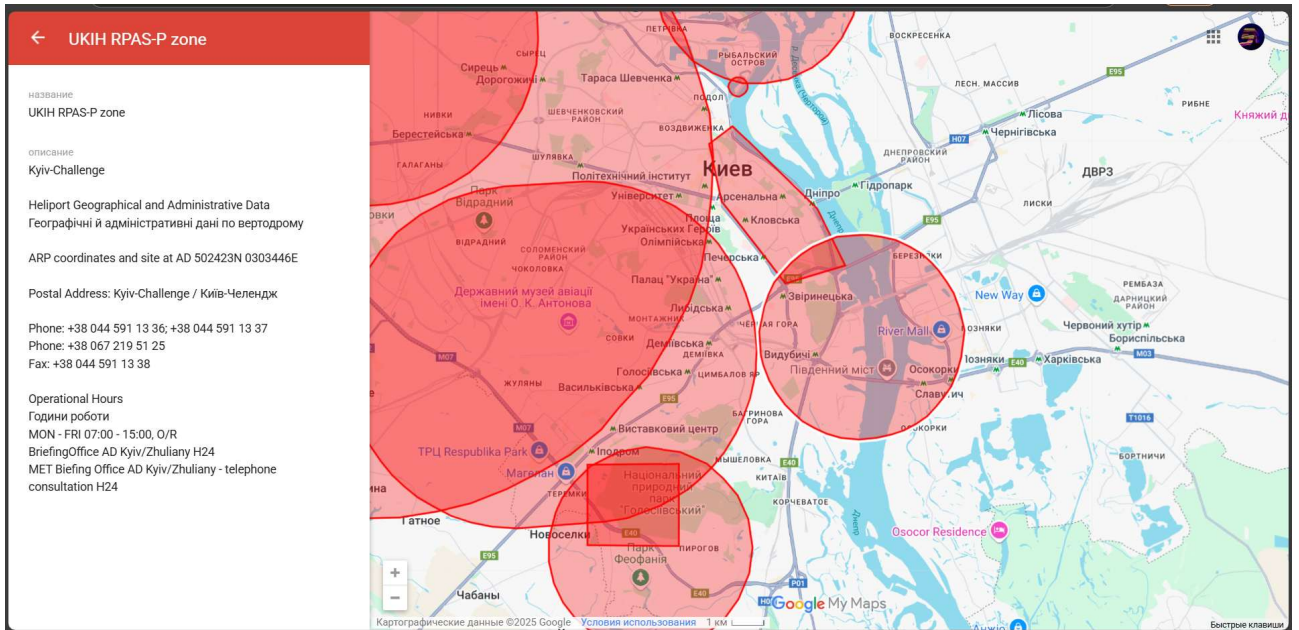


Рис. 1.8. Карта зон заборон і обмежень використання повітряного простору м. Київ

1.4. Вимоги до точності виконання робіт

Попри відсутність прямих нормативів щодо точності цифрових моделей рельєфу (ЦМР), окремі етапи виконання робіт усе ж регулюються чинними нормативно-правовими актами. Зокрема:

Точність GNSS-прив'язки контрольних точок

Відповідно до ДСТУ ISO 17123-8:2018, для високоточного геодезичного забезпечення прийнятною є похибка визначення положення опорних точок

у межах 0,01–0,05 м у плані та до 0,05 м по висоті за умови використання RTK або PPK режимів GNSS-обладнання.

Фотограмметричне знімання На практиці точність фотограмметричної 3D-моделі оцінюється за залишковими похибками (RMSE) при вирівнюванні

контрольних точок. Доброю вважається така модель, у якій:
середньоквадратична похибка у плані не перевищує 2–3 см,
по висоті — до 5 см,
роздільна здатність моделі (GSD) не гірша за 2–5 см/піксель, залежно від висоти польоту та характеристик камери.

Похибка визначення об'ємів

За наявності якісної прив'язки та детальної моделі місцевості, загальна похибка розрахунку об'ємів насипів або виїмок може бути обмежена 1–3% від фактичного значення. В абсолютних одиницях це становить 0,01–0,03 від загального об'єму. Наприклад, при об'ємі насипу 300 м³, гранична похибка може складати 3–9 м³. За умов рівномірного розподілу похибки по висоті, це відповідає середній допустимій похибці за висотою близько 0,10–0,20 м. Це співвідноситься з точністю побудови ЦМР і є прийнятним рівнем для інженерно-геодезичних робіт, попри відсутність закріплення в національних будівельних нормах.

РОЗДІЛ 2. ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБІТ

Геозезичне забезпечення робіт складається з польової та камеральної підготовки.

Польова підготовка полягає у закладанні опорних точок на місцевості і визначення їх планово-висотного положення. Після створення опорної мережі виконується аерофотозйомка досліджуваної ділянки. Зйомка здійснюється з використанням аерофотокамери (АФА), встановленої на безпілотному літальному апараті (БПЛА).

До камеральної підготовки відноситься планування маршрутів польоту БПЛА з урахуванням рельєфу, перешкод, площі охоплення.

Обробка отриманих знімків у спеціалізованому програмному забезпеченні (Agisoft Metashape, Reality Capture, Pix4D).

Побудова тривимірної моделі місцевості, ортофотоплану та цифрової моделі рельєфу;

Розрахунок об'ємів земляних мас

2.1 Загальні відомості про моделювання фотограмметричним методом.

Фотограмметрія — це наука, технологія та мистецтво отримання достовірної інформації про фізичні об'єкти та навколишнє середовище шляхом реєстрації, вимірювання та інтерпретації зображень, отриманих за допомогою електромагнітного випромінювання. Основна мета — точне визначення просторових (3D) координат об'єктів і рельєфу за двовимірними (2D) знімками.

Застосування включає:

- визначення координат;
- обчислення відстаней, висот, площ і об'ємів;
- побудову топографічних карт;
- створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) і ортофотопланів.

З розвитком цифрових технологій фотограмметрія перейшла від аналогових оптико-механічних методів до аналітичної та цифрової фотограмметрії, включно з концепцією Structure from Motion – Multi-View Stereo (SfM-MVS).

У поєднанні з розвитком БПЛА це дало можливість швидко й економічно отримувати високоточні 3D-дані.

Існує два основні типи фотограмметрії:

1. Аерофотознімання (камера в повітрі),
2. Наземна фотограмметрія (камера тримається в руках або встановлена на штативі).

Фотографія — як аналогова, так і цифрова — є результатом центральної проєкції, також відомої як єдина точка сходження. Відстані від центральної точки сходження — оптичного центру об'єктива камери, або експозиційної станції — до сенсора з одного боку та до об'єкта з іншого боку визначають найосновнішу властивість зображення, а саме його масштаб.

Центральна проєкція призводить до ефекту радіального спотворення рельєфу - об'єкти, які виступають над або лежать нижче рівня площини зйомки, зміщуються на знімку. Це використовується у стереоскопічному аналізі для визначення висот об'єктів за допомогою паралаксу. [12]

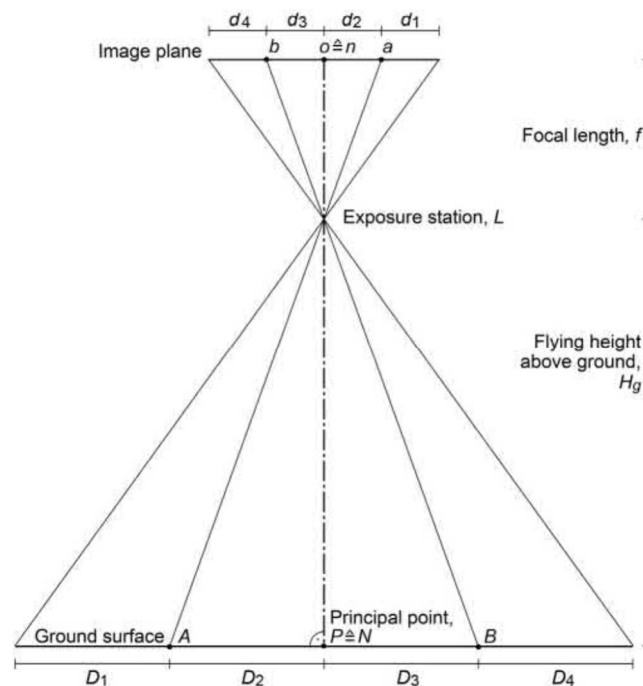


Рис. 2.1. Вертикальний знімок над абсолютно рівною місцевістю.

На рисунку 2.1 зображено ідеальний випадок вертикального знімка, зробленого з ідеальною центральною перспективою над абсолютно рівною горизонтальною місцевістю.

Оптична вісь через експозиційну станцію L перетинає площину зображення в головній точці (o), яка збігається з центром знімка, і перетинає землю під прямим кутом у точці на землі, яка називається головною точкою на місцевості (P). У цьому випадку так звана лінія надіру, яка є вертикальною лінією через експозиційну станцію L , збігається з оптичною віссю камери, а відповідно, фотографічна і земна точки надіру n і N збігаються з головними точками.

Трикутники, утворені за допомогою відстані на місцевості D — наприклад, відстані D_2 між точками A і P — та висоти польоту над землею H_g з боку місцевості, а також відповідної відстані на знімку d_2 і фокусної відстані f з боку камери, є геометрично подібними для будь-яких заданих D і d ; масштаб S або $1/s$ знімка є однаковим у кожній точці.

$$S = \frac{1}{s} = \frac{f}{H_g} = \frac{d}{D} \quad (2.1)$$

Якщо відомо масштаб зображення S , це рівняння можна розв'язати відносно D , щоб обчислити ширину або довжину ділянки місцевості, яку охоплює знімок, використовуючи ширину або довжину зображення на сенсори або плівці як d .

Перетворивши рівняння 2.1, можна отримати поширене рівняння для висоти зйомки H_g

$$H_g = f * s \quad (2.2)$$

Якщо формат зображення квадратний, площа покриття A на місцевості може бути виведена шляхом піднесення до квадрата рівняння 2.1. Для SFAP-камер це зазвичай не так, тому враховують прямокутний формат зображення (де d_L — довжина зображення, d_W — ширина):

$$\frac{1}{s^2} = \frac{(d_L * d_W)}{(W_L * D_w)} = \frac{a}{A} \quad (2.3)$$

Або

$$A = (d_L * d_W) * s^2 \quad (2.4)$$

За часів аналогової аерофотозйомки масштаб зображення був найважливішою описовою характеристикою, оскільки він дозволяв користувачу оцінити ступінь деталізації, яку можна виявити на знімку. [12]

Для цифрових зображень, які можна легко збільшувати на екрані, початковий масштаб на сенсорі має менше значення. У цьому випадку просторову роздільну здатність або найменшу видиму деталь на фотографії визначає розмір елемента земної поверхні (Ground Sample Distance, GSD)

Точний розмір пікселя (sensor cell), необхідний для обчислення GSD, можна визначити за даними з паспорту фотокамери про розмір сенсора в міліметрах і кількість пікселів.

$$GSD = (\text{pixel element size}) * \frac{H_g}{f} \quad (2.5)$$

Або

$$GSD = \left(\text{sensor width} / \text{image width in pixels} \right) * \frac{H_g}{f} \quad (2.6)$$

Оскільки зв'язок є лінійним, будь-яка зміна H_g або f змінює масштаб та відстані на зображенні у тому ж співвідношенні.

Наприклад, подвоєння висоти польоту призводить до знімка з удвічі меншим масштабом і меншими відстанями d ; потроєння фокусної відстані збільшує масштаб і розміри на знімку втричі.

Насправді більшість аерофотознімків — особливо маломасштабних знімків з малоформатної аерофотозйомки— відхиляються від ситуації, показаної на рис. 2.1, з трьох причин:

1. Поверхня землі не є абсолютно рівною, тобто відстань між площиною зображення та землею змінюється в межах одного знімка.
2. Фотографія не є повністю вертикальною, тобто оптична вісь не перпендикулярна до земної поверхні.
3. Центральне проектування є недосконалим через спотворення об'єктива, тобто промені світла викривляються при проходженні через лінзу.

Усі ці ситуації псують просторову подібність трикутників і призводять до змін масштабу та, отже, геометричних викривлень об'єктів на зображенні. Ці проблеми можна мінімізувати за допомогою сучасних технологій виробництва для професійної аерофотозйомки високоточного обладнання, але вони можуть бути досить серйозними для платформ і камер, які часто використовуються в малоформатній аерофотозйомці. Перша проблема — масштаб, варіації масштабу та геометричні викривлення, спричинені варіаціями рельєфу, не залежать від характеристик камери й виникають у будь-якому дистанційному зображенні. Однак це також означає, що проблеми будуть набагато серйознішими для МФАП (малоформатної аерофотозйомки), ніж для традиційної аерофотозйомки через меншу висоту польоту та, отже, порівняно вищі варіації рельєфу. [12]

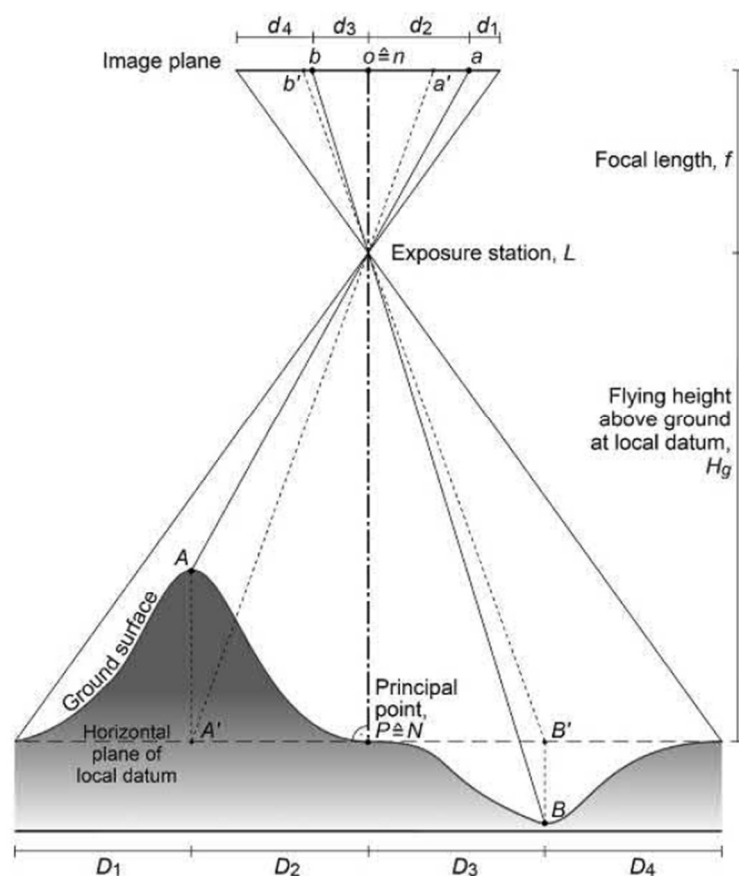


Рис. 2.2. Вертикальний аерофотознімок, виконаний над місцевістю зі складним рельєфом

Рисунок 2.2 ілюструє вплив різних відхилень на геометрію вертикального фотознімка. Усі точки, що лежать на одній висоті з надірною точкою (головна точка збігається з головною точкою знімка), мають однакову шкалу. Точки, що знаходяться нижче горизонтальної площини, ближчі до камери, а отже, мають більший масштаб; точки вище горизонтальної площини — далі від камери, отже, мають менший масштаб. Водночас положення точок на зображенні зміщується радіально назовні (для вищих точок) або всередину (для нижчих точок) від центру зображення. Це відбувається тому, що вони розташовані під іншим кутом, ніж якби вони були в тій самій горизонтальній площині, здаючись ближчими або дальшими від точки зйомки в центрі зображення.

Це так зване зміщення рельєфу або радіальне викривлення чітко розпізнається оператором, оскільки об'єкти, відомі як вертикальні з землі — такі як дерева або будівлі — тепер розглядаються з іншої перспективи до країв зображення. Воно набагато менш помітне для змінної місцевості. Зміщення рельєфу збільшується з відстанню до центру зображення. Воно обернено пропорційне висоті польоту та фокусній відстані: зміщення менше для довших фокусних відстаней, оскільки в обох випадках кути нахилу є відносно меншими.

Цей ефект зміщення рельєфу може значною мірою вплинути на вимоги аналізу зображень для тематичного картографування або мозаїкування зображень — вимагаючи мінімального викривлення для досягнення більшої точності. Найкращі результати досягаються за допомогою телеоб'єктива з великою фокусною відстанню. Проте зображення, що використовуються для стереоскопічного перегляду та аналізу, повинні мати вищі зміщення рельєфу і паралакси, що краще досягається за допомогою ширококутних об'єктивів і нижчих висот польоту. [12]

Нахилене фотографування

Жодне з попередніх рівнянь не дійсне для похилих знімків з неvertикальною оптичною віссю, оскільки положення об'єкта залежать від кута нахилу та кутової орієнтації знімка.

Величина нахилу виражається за допомогою кута ν , який є кутом між оптичною віссю та вертикаллю, що проходить через центр знімка (надірна лінія), і є компонентою похилого кута. Топографічний рельєф вводить додаткові масштабні варіації та зміщення, аналогічні до вертикального знімка — це показано на рис. коли нахил відбувається в напрямку головної точки або в бік від неї. [12]

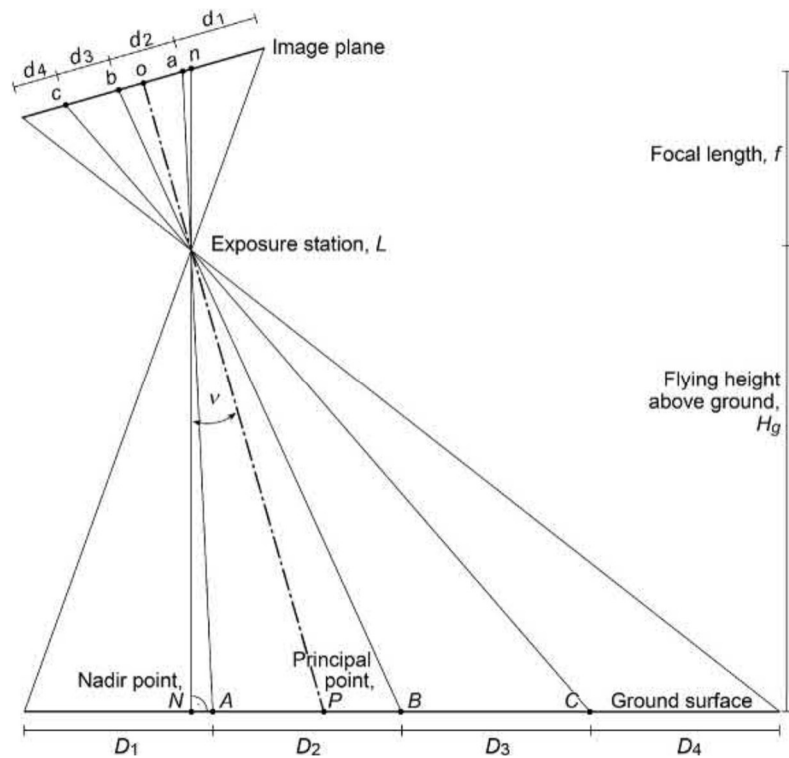


Рис. 2.3. Низькопохилий знімок, зроблений над абсолютно рівною місцевістю.

Вертикальна лінія, що проходить через центр перспективи L , перетинає площину зображення в точці n — надірній точці знімка — і під прямим кутом перетинає землю в N — надірній точці на місцевості. Кут між надірною лінією та оптичною віссю камери називається кутом надірності (ν). Відстані D_1 – D_4 на землі є однаковими, але відповідні відстані d_1 – d_4 на знімку змінюються — це відображає викривлення, спричинене перспективою.

Похилі знімки корисні для огляду територій і, як правило, легші для розуміння та тлумачення непрофесіоналами. Оскільки нахилення спрощують дотримання багатьох принципів і алгоритмів класичної фотограмметрії, похилі знімки зазвичай уникають для вимірювань.

Однак вони мають свої переваги в реєстрації об'єктів складного рельєфу та тривимірних об'єктів, а також у фотограмметричних робочих процесах, заснованих на сучасних методах, таких як SfM-MVS, які можуть поєднувати вертикальні та похилі знімки. [12]

Внутрішнє орієнтування (Interior orientation):

Внутрішнє орієнтування у фотограмметрії спрямоване на трансформацію координат точок, виміряних або обчислених на цифровому знімку, з їхньої власної системи координат (початок якої знаходиться у головній точці знімка) у стандартну просторову прямокутну (декартову) систему координат. У фотограмметрії завдання визначення елементів внутрішнього орієнтування називають калібруванням знімка.

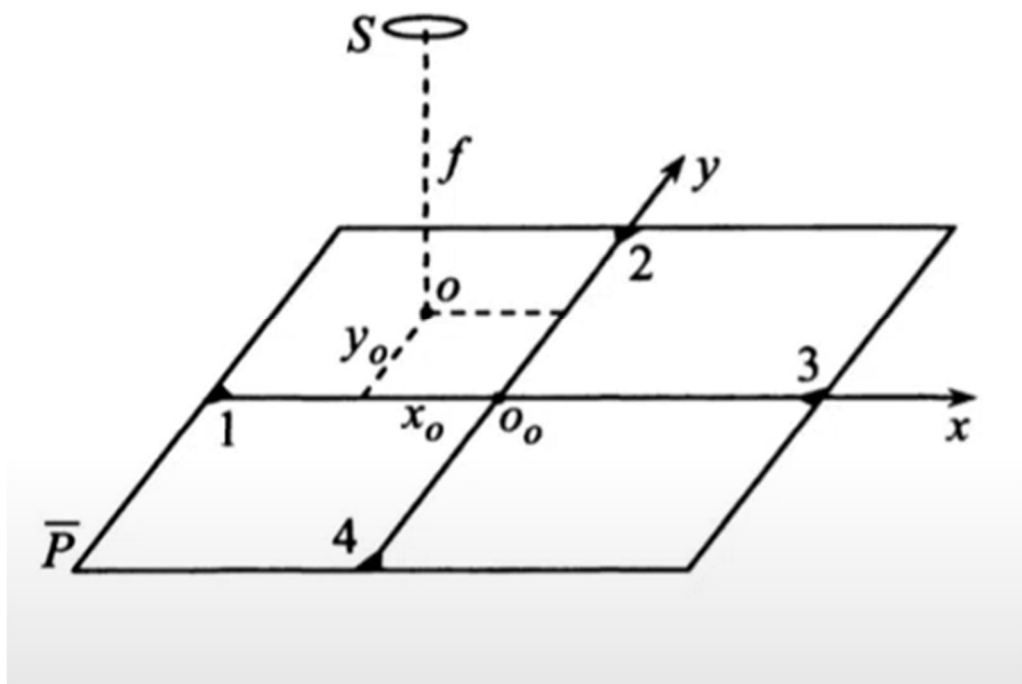


Рис. 2.4. Елементи внутрішнього орієнтування

Елементи внутрішнього орієнтування знімка називають величини x_0 ; y_0 ; f , які однозначно визначають розміщення центра проєкції S відносно площини знімка P . Також визначаються параметри дисторсії об'єктива. [10]

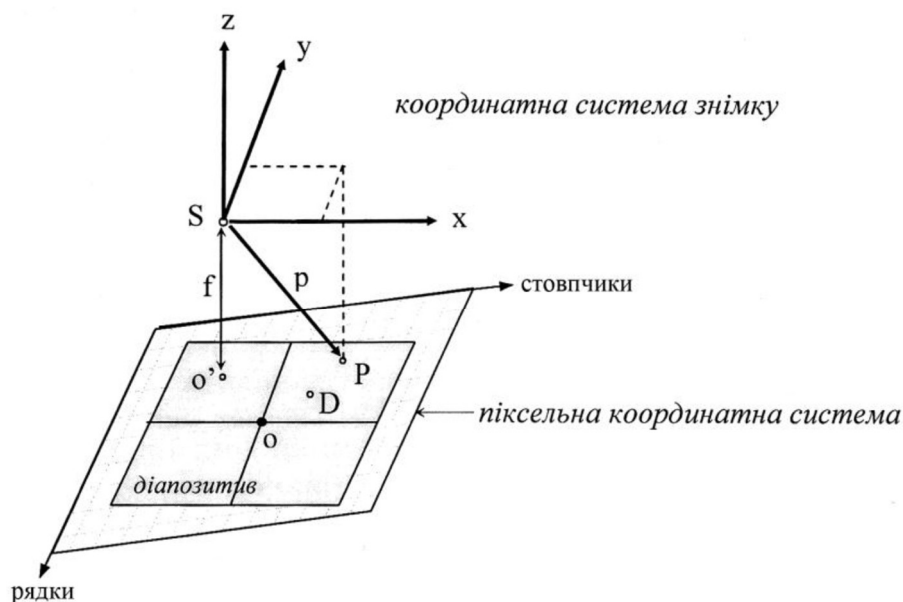


Рис. 2.5. Системи координат знімка

Кінцеву прямокутну систему координат прийнято називати системою координат цифрового піксельного зображення або піксельною системою координат монітора. Таким чином, внутрішнє орієнтування фактично є процесом перетворення координат з піксельної системи координат знімка в піксельну систему координат монітора.

Початок координат у системі координат знімка (позначається як O) визначається як точка перетину уявних прямих, що з'єднують протилежні координатні мітки, нанесені на знімок. Головна точка знімка (або головна точка автоколімації камери, що позначається як O') являє собою вертикальну проєкцію центра проєкції знімка (S) на площину піксельної системи координат. В ідеалі, головна точка знімка повинна збігатися з початком системи координат знімка. Точка найкращої симетрії (D) є початком координат для опису радіальної дисторсії об'єктива. Координатна площина xu є паралельною площині піксельного знімка, при цьому позитивний напрямок осі x співпадає з напрямком аерофотознімання; f – фокусна відстань аерофотокамери (довжина перпендикуляра від точки S до точки O).

Для здійснення перетворення координат з піксельної системи в систему координат знімка необхідно вирішити наступні завдання:

- Усунення невідповідності початків координат: Координатні мітки на цифровому зображенні можуть не збігатися з фактичними координатними мітками на знімку, що призводить до розбіжності їхніх початків координат.
- Врахування положення головної точки: Головна точка знімка (O') зазвичай не співпадає з початком координат знімка (O).

Отже, типовий алгоритм внутрішнього орієнтування включає такі етапи:

1. Визначення координат центру знімка на цифровому зображенні: Шляхом вимірювання координат координатних міток на цифровому (растровому) знімку в піксельній системі обчислюється точка перетину умовних ліній, що їх з'єднують.
2. Суміщення системи координат знімка з системою координат монітора: Використовуються відомі в результаті калібрування камери координати початку координат знімка для його суміщення з початком координат цифрового зображення на моніторі. На цьому етапі визначаються масштабний коефіцієнт (що враховує різницю між еталонними відстанями між координатними мітками та їхніми виміряними значеннями), кут повороту растрового зображення, а також вводяться значення дисторсії об'єктива (якщо вони відомі).
3. Перехід від головної точки знімка до початку координат монітора: Враховується зміщення між головною точкою знімка та початком координат монітора (їхнє розташування зазвичай не збігається).

У випадку, коли величини дисторсії об'єктива невідомі, значення внутрішнього орієнтування x_0, y_0 приймаються рівними нулю і саме в такому вигляді заносяться до вихідного масиву даних. [10]

Взаємне орієнтування (Relative Orientation): Основна ціль взаємного орієнтування полягає у створенні об'ємної моделі досліджуваної території в умовній (фотограмметричній) системі координат.

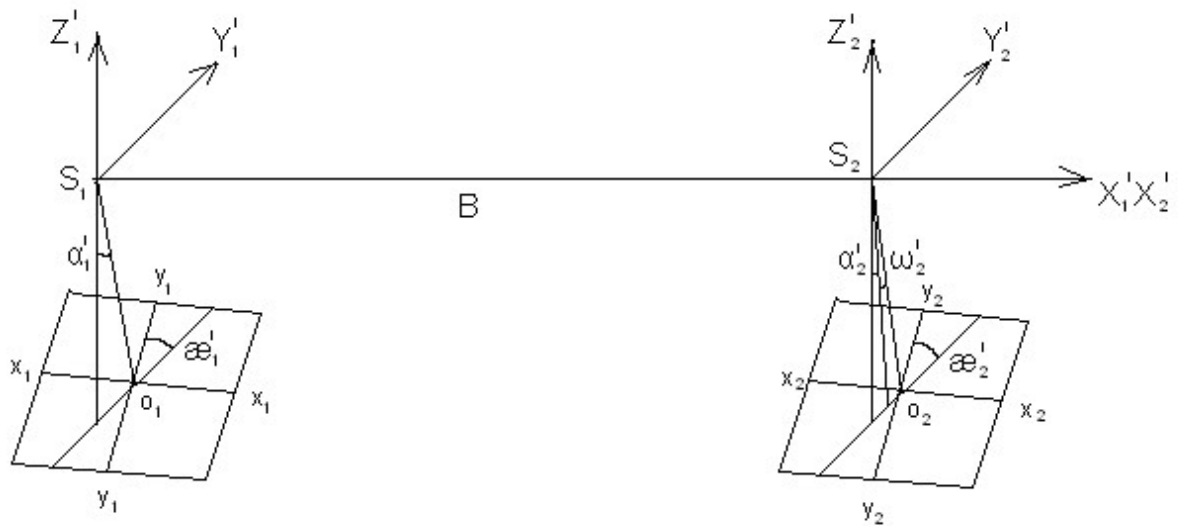


Рис. 2.6. Базисна система елементів взаємного орієнтування

За початок координат приймають лівий центр фотографування S_1 . Система координат $S_1Z'_1Y'_1X'_1$ паралельна системі $S_2Z'_2Y'_2X'_2$, вісь X'_1 суміщена з віссю X'_2 , вісь Z'_1 лежить в головній базисній площині $S_1O_1S_2$.

α'_1 – повздовжній кут нахилу лівого знімка, утворений головним променем лівого знімка і віссю $S_1Z'_1$ (перпендикуляром до базису)

ϵ'_1 – кут розвороту лівого знімку в своїй площині, утворений віссю y_1 і площиною $S_1Z'_1Y'_1$.

α'_2 – повздовжній кут нахилу правого знімка, утворений віссю $S_2Z'_2$ (перпендикуляром до базису) та проекцією головного променя на площину $S_2Z'_2X'_2$.

ω'_2 – Взаємний поперечний кут нахилу на правому знімку, утворений головним променем і його проекцією на площину $S_2Z'_2X'_2$.

ϵ'_2 – кут розвороту правого знімку в своїй площині, утворений віссю y_2 і площиною $S_2Z'_2Y'_2$.

Під час зйомки стереопари кожна точка на місцевості фіксується двома проєкційними променями, що йдуть до двох центрів фотографування і далі потрапляють на відповідні знімки.

Базис фотографування та ці два промені утворюють базисну площину.

При подальших обчисленнях або проектуванні необхідно забезпечити, щоб базис і відповідна пара проєкційних променів знаходилися в одній площині (умова компланарності). Виконання цієї умови гарантує перетин проєкційних променів, що дозволяє визначити просторові координати точки місцевості на основі координат її зображень на знімках.

Таким чином, завдання взаємного орієнтування полягає у досягненні перетину відповідних проєкційних променів, що практично означає усунення або мінімізацію поперечних паралаксів (q) до допустимих значень. В математичному плані ця задача вирішується шляхом розв'язання системи з п'яти рівнянь. Кожне рівняння відображає залежність між величиною поперечного паралаксу певної точки, її координатами на знімку та елементами взаємного орієнтування. Для успішного розв'язання та контролю цієї системи рівнянь необхідно виміряти координати та поперечні паралакси щонайменше шести контрольних точок. [10]

Зовнішнє орієнтування (Exterior Orientation):

Просторова цифрова модель місцевості (ЦММ), отримана після взаємного орієнтування, має довільну орієнтацію та масштаб відносно геодезичної або будь-якої іншої визначеної системи координат. Це означає, що без додаткових дій неможливо визначити дійсні координати точок місцевості за їхнім положенням у створеній моделі.

Мета зовнішнього орієнтування полягає в тому, щоб "розгорнути" та масштабувати створену просторову модель таким чином, щоб її координатна система повністю співпала з прийнятою геодезичною (на місцевості) або умовною системою координат. Математично це завдання зводиться до встановлення функціональної залежності між координатами точок в обох системах.

Елементи зовнішнього орієнтування – це величини , що визначають положення лівого і правого центрів проєкцій S_1 та S_2 і відповідних площин лівого P_1 та правого P_2 знімків у вибраній просторовій системі координат $OXYZ$. Цими елементами є: X_{S_1} Y_{S_1} Z_{S_1} -просторові координати лівого центра проєкції S_1 ;

$\alpha_1, \omega_1, \kappa_1$ - повздовжній поперечний кути нахилу лівого знімку P_1 та кут його розвороту ;

$X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2}$ – просторові координати правого центра проекції S_2 ;

$\alpha_2, \omega_2, \kappa_2$ - повздовжній поперечний кути нахилу правого знімку P_2 та кут його розвороту.

Для обчислення параметрів цього перетворення координат необхідні спільні характеристики, наявні в обох системах координат. Традиційно такими спільними елементами є опорні точки (опознаки, GCP – Ground control points) – точки, координати яких точно відомі в прийнятій просторовій системі координат місцевості і які можливо чітко ідентифікувати та виміряти в умовній координатній системі створеної моделі.

Для кожної стереопари рекомендується мати щонайменше три опорні точки, розташовані в зоні перекриття знімків. Однак для забезпечення належного контролю якості орієнтування бажано використовувати 4-5 опорних точок, рівномірно розподілених по всій площі перекриття. У будь-якому випадку, використання більшої кількості доступних опорних точок є корисним для підвищення точності створюваної картографічної основи та забезпечення її надійного контролю. [10]

Фототріангуляція

Фотограмметрична триангуляція використовується для згущення мережі геодезичних опорних точок, особливо коли кількість знімків перевищує два. Її мета - отримати нові опорні точки з відомими тривимірними координатами (X , Y - планові, Z - висота). Ці точки є основою для зовнішнього орієнтування створеної просторової фотограмметричної моделі та для подальшого отримання різноманітної фотограмметричної продукції.

Фототріангуляція виконується на серії знімків, які об'єднуються в маршрути (отримані за один прохід літака, часто для лінійних об'єктів) або блоки (що складаються з кількох паралельних або іншої конфігурації маршрутів для зйомки великих територій).

Для забезпечення безперервного покриття території між сусідніми знімками створюються перекриття. Поздовжнє перекриття (вздовж напрямку польоту в межах одного маршруту) зазвичай становить не менше 60%, що забезпечує подвійне покриття кожної ділянки для створення стереоефекту. Поперечне перекриття (між сусідніми маршрутами в блоці) складає 30-40%. Окрім подвійного, часто утворюється потрійне перекриття, яке є важливим для фототріангуляційних мереж згущення, запобігання пропускам при стереовимірюваннях та зв'язку між окремими стереопарами.

У цифровій фотограмметрії немає жорстких вимог до розміщення опорних та зв'язкових точок. При обробці блоків і маршрутів допускається відносно рідке розміщення опорних точок - по кутах блоку та в його центральній частині. Зв'язкові точки фіксуються на кожному знімку в зонах міжмаршрутного перекриття та в шести стандартних зонах поздовжнього перекриття кожної стереопари (мінімум 3-4 точки в кожній зоні). [10]

Ортофототрансформування:

Основна мета ортофототрансформування полягає у перетворенні перспективного зображення аерофотознімка в ортогональну проєкцію. Це дозволяє усунути геометричні спотворення, спричинені рельєфом місцевості, особливостями центральної проєкції знімка, дисторсією об'єктива та нахилами знімка.

Результатом ортофототрансформування є ортофотозображення, які поєднують геометричну точність карти з детальною інформацією фотографічного зображення. Вимірювання, проведені на ортофотознімках, відповідають вимірюванням на місцевості.

Для створення ортофото необхідна інформація про рельєф місцевості (у вигляді цифрової моделі рельєфу - ЦМР) та параметри аерофотознімання. З математичної точки зору, процес отримання ортофото полягає у введенні відповідних поправок у координати точок фотограмметричної моделі з урахуванням висот точок місцевості. [10]

Цифрові моделі поверхні:

У процесі геодезичного аналізу та моделювання місцевості використовуються різні типи цифрових моделей. Вони відрізняються складом інформації та деталізацією опису земної поверхні:

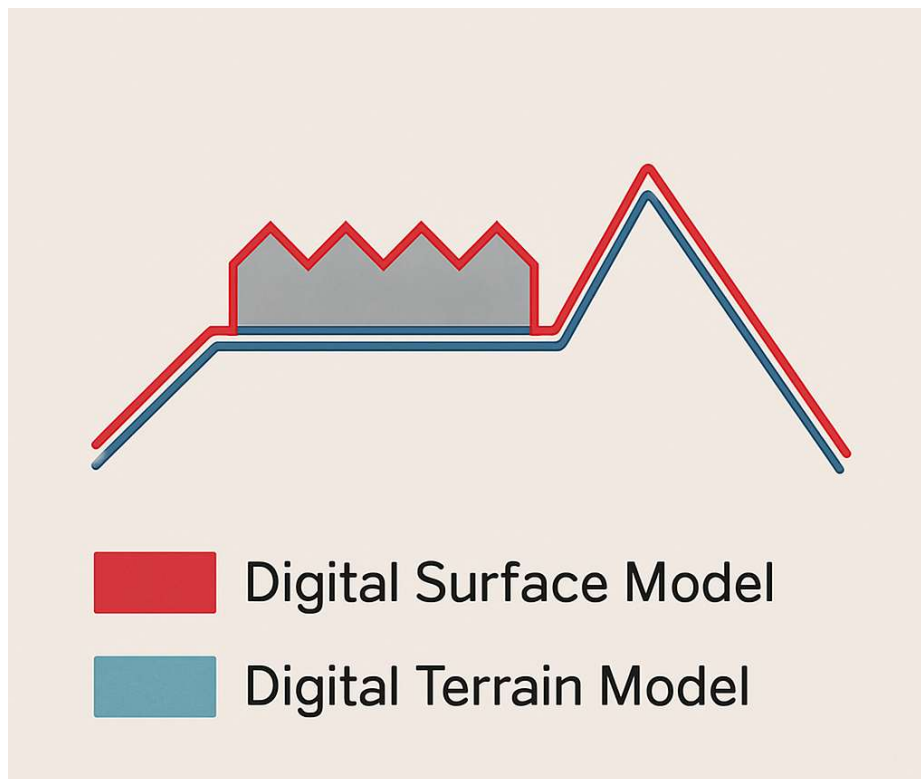


Рис. 2.7. Цифрові моделі поверхні

DSM: Digital Surface Model — Цифрова модель поверхні

DTM: Digital Terrain Model — Цифрова модель рельєфу

DEM: Digital Elevation Model — Цифрова модель висот

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) — це набір тривимірних координат (X , Y , Z), які описують форму поверхні землі без урахування об'єктів, що на ній розташовані. Її використовують для аналізу природного рельєфу, наприклад, при проєктуванні дорожніх трас або оцінці схилів.

Цифрова модель місцевості (ЦММ) — являє собою числовий масив, у якому кожен елемент містить координати (X , Y , Z) певної точки, а також додаткову інформацію, закодовану у вигляді чисел або символів.

Ця інформація може стосуватись типу поверхні (наприклад, асфальт, ґрунт, трава) або функціонального призначення об'єкта (наприклад, будівля, дорога, водойма).

Цифрова модель поверхні (ЦМП) — включає в себе координати не лише земної поверхні, але й усіх об'єктів, що знаходяться на ній: будівель, дерев, технічних споруд тощо. Така модель найточніше відображає реальну ситуацію на місцевості на момент знімання.

Для виконання ортофототрансформування потрібна інформація про висоти точок місцевості. У цифровій фотограмметрії ця інформація представляється у вигляді цифрових моделей рельєфу (ЦМР). ЦМР являє собою впорядковану структуру висотних даних, найчастіше у вигляді сітки квадратів (регулярна ЦМР) або трикутників (нерегулярна ЦМР), де у вузлах сітки або вершинах трикутників задані значення висот. Точність ЦМР безпосередньо залежить від точності висот вихідних точок, за якими вона була побудована, а також від заданого кроку сітки або щільності триангуляції. [1]

2.2 Геодезичні роботи при створенні планово-висотної основи.

Перед проведенням аерофотознімання за допомогою безпілотного літального апарата (БПЛА) необхідно було створити високоточну планово-висотну геодезичну основу. Це є критично важливим для забезпечення геометричної точності ортофотопланів і формування достовірної тривимірної моделі місцевості. Така основа складається з опорних точок з точно визначеними координатами у єдиній державній системі координат, які надалі використовуються як контрольні під час фотограмметричної обробки.

У межах ділянки, де виконувались роботи з оцінки об'ємів земляних мас, було закладено пункти геодезичної знімальної основи (GCP). Для їх легкої ідентифікації на знімках точки позначались білою аерозольною фарбою у вигляді контрастних міток. Це забезпечувало видимість навіть у складних умовах фону (рослинність, техногенні об'єкти, асфальт, бетон тощо). Такі мітки суттєво полегшували візуальну прив'язку під час камеральної обробки.

Опорні точки були рівномірно розподілені по всій площі зйомки для досягнення однорідного охоплення та мінімізації помилок при ортотрансформуванні. При виборі місця для розміщення точок враховувались умови освітлення (відсутність тіні, щільної рослинності) та відкритість горизонту для прийому GNSS-сигналів.

GNSS-знімання та визначення координат

Для визначення координат опорних пунктів застосовувався метод GNSS RTK (Real-Time Kinematic), що дозволяє отримати координати в реальному часі з точністю до 2–3 см у плані та до 3–5 см по висоті. Метод RTK базується на використанні базової станції та ровера, які працюють у парі: базова станція передає поправки на мобільний приймач через радіоканал або мобільний Інтернет, що дозволяє проводити точні вимірювання безпосередньо на місцевості.

Кожна точка вимірювалася з витримкою не менше 30 секунд для забезпечення стабільності сигналу та мінімізації похибок. Усі вимірювання проводилися в державній геодезичній системі координат УСК-2000. Для вертикального компонента застосовано Балтійську систему висот 1977 року, що забезпечує узгодження з існуючими топографічними матеріалами.

Референці системи координат, що використовуються в GNSS зніманнях.

Під час використання супутникових методів позиціювання для розв'язання геодезичних задач застосовуються як загальноземні референці системи координат (WGS-84, ITRS, ETRS89), так і національні або локальні системи. Кожна з них має своє призначення та історію впровадження.

1. Загальноземна геодезична референцна система WGS-84.

Система координат WGS-84 (World Geodetic System 1984) розроблена Військово-картографічним агентством Міністерства оборони США.

Вона є глобальною і використовується як єдина координатна система для супутникової навігації.

Початок координат WGS-84 розташований у центрі мас Землі. За нульовий меридіан прийнято IERS Reference Meridian, зміщений на 5,31" на схід від Грінвіцького.

За основу системи взято еліпсоїд з великим (екваторіальним) радіусом 6 378 137 м та полярним радіусом 6 356 752,314 м. З 1987 року система використовується в GPS, а з 1994 року впроваджено реалізацію WGS-84 (G730), що повністю базується на GPS-вимірах. Подальші дослідження та 15-денні сеанси спостережень у 2001 році дозволили створити оперативну реалізацію WGS-84, яка забезпечує точність координат опорних станцій до 1 см.

2. Міжнародна земна референсна система координат ITRS.

ITRS задається Міжнародною службою обертання Землі (IERS) і має початок у центрі мас планети, включаючи океани та атмосферу. Реалізація цієї системи відбувається через каталоги координат і швидкостей зміни положення станцій, розміщених по всьому світу. З 1988 до 2010 року розроблено 12 реалізацій системи ITRF (від ITRF88 до ITRF2008), кожна з яких мала вищу точність за попередню.

Сучасні вимірювання дозволяють фіксувати рух пунктів з точністю до 0,5 мм/рік, що є важливим для вивчення тектоніки та моніторингу деформацій земної кори. Наприклад, ITRF2000 містить координати понад 800 пунктів, жорстко пов'язаних з поверхнею Землі.

3. Загальноєвропейська референсна система координат ETRS89.

За аналогією з ITRS, європейська система отримала назву ETRS (European Terrestrial Reference System), а її реалізація — ETRS89. У цій системі координати є ідентичними координатам ITRS для 1989 року, проте вона фіксована відносно Євразійської літосферної плити.

Ключову роль у підтримці точності ETRS89 відіграє мережа постійно діючих GNSS-станцій EPN (EUREF Permanent Network), що забезпечує рівномірне покриття європейського континенту.

4. Національні та місцеві референсні системи координат.

Із впровадженням GNSS-технологій постала потреба у співіснуванні загальноземних систем координат з традиційними національними системами.

Повна відмова від класичних систем призвела б до втрати узгодженості з просторовими даними, що формувались десятиліттями.

Тому важливим стало забезпечення сумісності сучасних технологій із наявною координатною базою.

Історично кожна країна створювала свою національну систему незалежно. Так з'явилися: CH1903 (Швейцарія), MGI (Австрія), DHDN (Німеччина), NFD27 (Північна Америка), OSGB36 (Велика Британія), ROMA40 (Італія), СК-42 (колишній СРСР) та ін. Точність положення пунктів у таких системах часто досягала 1 метра і більше.

Система СК-42 була основною координатною системою в Україні після проголошення незалежності. Вона створювалась на базі триангуляції, трилатерації та полігонометрії у першій половині ХХ століття. За точністю: середня квадратична помилка кута в трикутниках становила $\pm 0,7''$ (1 клас) і $\pm 1''$ (2 клас), похибки довжин базових сторін — не більше 1:300 000. Проте через жорстке приєднання мереж 2 класу до 1 класу виникали спотворення, особливо у міських районах. Помилки в слабких місцях могли перевищувати 0,5 м. У 1963 році для цивільного використання було введено умовну систему СК-63, побудовану на триградусних зонах проекції Гаусса-Крюгера. В ній спеціально змінювались координати та ускладнювався перехід між СК-42 та СК-63.

Місцеві системи координат (МСК) встановлюються для зменшення проекційних спотворень, полегшення використання при топографо-геодезичних роботах і побудови планів у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 у межах населених пунктів.

Система координат УСК-2000 була введена як державна 1 січня 2007 року. Носієм координат цієї системи є ДГМ.

Це державна геодезична референсна система координат, отримана у результаті сумісного зрівноваження близько 800 пунктів супутникової мережі та результатів класичних геодезичних вимірювань на більш ніж 20000 пунктів ДГМ

та строго узгоджена з реалізацією референцної системи ITRS, а саме з ITRF2000.

Особливостями цієї нової національної референцної системи є те, що:

- Система координат УСК-2000 встановлена під умовою паралельності її осей просторовим осям Міжнародної загальноземної референцної системи координат ITRS. За поверхню відліку в системі координат УСК-2000 прийнятий референц-еліпсоїд Красовського;

- Система координат УСК-2000 чітко узгоджена з Міжнародною загальноземною референцною системою координат ITRS-ITRF2000, яка закріплена пунктами космічної геодезичної мережі.

- Практичною цінністю нової системи координат є можливість ефективного використання GNSS-технологій в топографогеодезичному виробництві.

Сучасні технології GNSS дозволяють вирішувати геодезичні завдання різного рівня: від розвитку державної геодезичної мережі до інвентаризації земельних ділянок. Практика показує, що продуктивність праці зростає при цьому в десятки разів і залежить, в основному, від необхідної точності визначення координат, ліміту часу на виміри, умов виконання робіт, застосування різних типів GNSS-приймачів. [4]

Контрольні точки

З метою забезпечення точності побудови цифрової моделі рельєфу та виконання об'ємних розрахунків, на території дослідження було закладено п'ять опорних геодезичних точок (GCP). Місця їх розміщення вибирались з урахуванням рівномірного покриття ділянки, доступності для GNSS-приймача та відкритості горизонту. Це дозволяє мінімізувати системні похибки і забезпечити якісну фотограмметричну реконструкцію.

Для чіткої візуальної ідентифікації на знімках з БПЛА всі пункти були розмічені білою аерозольною фарбою безпосередньо на поверхні (грунт, асфальт, бетон). Таке маркування забезпечує високий контраст з фоном місцевості та добре розпізнається як візуально, так і під час автоматизованої обробки фотознімків.

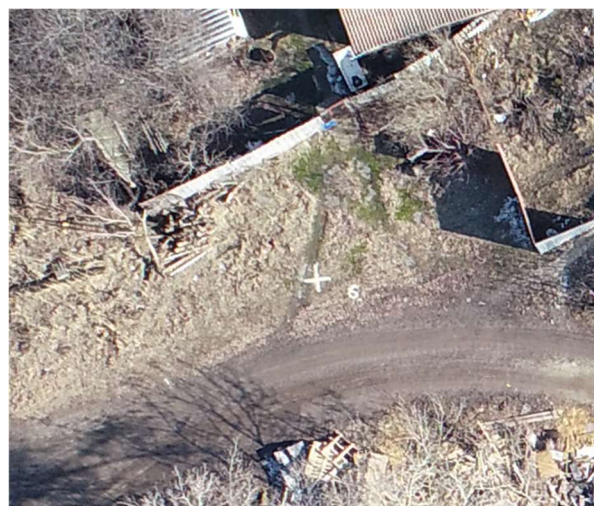


Рис. 2.8. Розташування контрольних точок

Нижче подано таблицю, що містить координати та висоти GCP, визначених методом RTK GNSS-знімання:

Таблиця 2.1

Координати опорних точок в державній системі УСК2000

№ точки	X (м)	Y (м)	H (м)	SD Easting (m)	SD Northing (m)	SD Ortho. Height (m)
300	327590.0938	5586046.6290	95.4480	0.0375	0.0490	0.0446
400	327366.5045	5586157.7318	95.3003	0.0420	0.0331	0.0331
500	327681.3704	5586180.4577	95.1414	0.0312	0.0473	0.0420
600	327771.6789	5586234.5875	95.3889	0.0442	0.0304	0.0494
700	327708.1930	5586076.5834	94.4865	0.0466	0.0342	0.0336
800	327512.9428	5586118.9773	97.2000	0.0337	0.0361	0.0405
900	327496.7360	5586111.4822	96.6582	0.0386	0.0358	0.0422
1000	327480.1407	5586232.9831	97.2863	0.0328	0.0358	0.0373
RTKM-0214	327980.7453	5586271.6095	97.4582	0.0027	0.0024	0.0036
RTKM-0215	327370.4637	5586306.4851	97.820657	0.0036	0.0034	0.0039
			Середнє	0.0383	0.0377	0.0404

Кількість пунктів визначалась, виходячи з площі об'єкта, розмірів ділянки та потреб у подальшій фотограмметричній обробці. Мінімальна кількість точок, рекомендована для фотограмметричної реконструкції із застосуванням БПЛА, складає 6-8 пунктів на кожні 2–3 га території. У даному випадку закладено достатню кількість точок для забезпечення стабільності обробки та точності моделі рельєфу.

2.3 Розрахунок точності та вибір обладнання

Точність визначення координат у плані та по висоті, що отримуються при використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА), залежить від двох основних чинників — похибки, що виникає при визначенні координат точок місцевості за стереопарою фотознімків (m_{ϕ}) та похибки визначення координат опорних знаків ($m_{оп}$). Загальна формула визначення похибки:

$$m_{БПЛА} = m_{\phi} + m_{оп} \quad (2.7)$$

Спочатку визначимо точність отримання координат точок місцевості у плані та по висоті на основі стереопари ($m_{д}$), після чого перейдемо до розрахунку допустимих значень середньоквадратичної похибки (СКП) для опорних знаків.

Початкові дані для обчислень беремо з технічних характеристик фотокамери дрона DJI та заданих параметрів аерофотознімання, поданих у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Параметри камери та знімання

Параметри камери		Параметри знімання
Розмір пікселя	2,41 мкм	Коротка сторона кадру направлена в сторону польоту
Фокусна відстань f	8,8 мм = 3659 пікселів	Повздовжнє перекриття $p = 70\%$
Формат кадру ($l_x * l_y$)	13,2 мм x 8,8 мм або 5472 px * 3648 px	Висота знімання $H = 141$ м

Для початку визначимо наземний розмір одного пікселя – GSD (*Ground Sampling Distance*), скориставшись співвідношенням між висотою польоту та фокусною відстанню:

$$GSD = \frac{H}{f} = \frac{141}{3659} = 0.039 \text{ м}$$

За умовою рівного впливу похибок можна прийняти, що точність вимірювання координат і паралаксів однакова, тобто $m_x = m_y = m$, тоді точність визначення координат точок на місцевості $m_{x\phi}$, $m_{y\phi}$ можна розрахувати за наступною формулою:

$$m_{x\phi} = m_{y\phi} = GSD * m \quad (2.8)$$

Приймаючи похибку паралаксу рівною 0,5 пікселя, отримаємо:

$$m_{x\phi} = m_{y\phi} = GSD * m = 0.039 * 0.5 = 19,5 \text{ мм}$$

Точність визначення відмітки залежить від величини базису фотографування і обчислюється за формулою:

$$m_{H\phi} = \frac{H}{b} m \quad (2.9)$$

Базис фотографування b в масштабі знімка визначаємо за формулою:

$$b = \frac{100 - p}{100} * l_x \quad (2.10)$$

$$b = \frac{100 - 70}{100} * 13,2 = 3.96 \text{ мм}$$

або в пікселях

$$b = \frac{100 - 70}{100} * 5472 = 1642 \text{ пікселів}$$

Відповідно точність визначення координат точок на місцевості $m_{H\phi}$ буде:

$$m_{H\phi} = \frac{H}{b} m = \frac{141}{1642} * 0,5 = 43 \text{ мм}$$

Згідно з інструкцією, точність планових координат потрібно розрахувати вздовж радіус-вектору, яку можна знайти з формулою:

$$m_{xy\phi}^2 = m_{x\phi}^2 + m_{y\phi}^2 \quad (2.11)$$

$$\text{При } m_{x\phi} = m_{y\phi}, m_{xy\phi} = m_{x\phi} \sqrt{2}$$

$$\text{Або } m_{xy\phi} = 19,5 \sqrt{2} = 27,6 \text{ мм}$$

СКП визначення координат по стереопарі для заданих параметрів наступна:

- в плані $m_{xy\phi} = 0,028 \text{ м}$

- по висоті $m_{H\phi} = 0,043 \text{ м}$

Тепер розрахуємо СКП вимірювання координат опорних знаків.

Для цього точність визначення координат таких контурів повинна відповідати вимогам визначення об'ємів земляних робіт.

Згідно з інструкції допустимі помилки в планових координатах та відмітках наступні:

- для планових координат: $\delta_{\text{доп}}(XY) = 0,5 \text{ м}$;
- для висотної координати: $\delta_{\text{доп}}(H) = 0,125 \text{ м}$;

Від допустимих помилок визначення координат перейдемо до допустимих середніх квадратичних значень.

$$\begin{aligned}m_{\text{доп}} &= 1,25 * \delta_{\text{доп}} \\m_{XY(\text{доп})} &= 1,25 * 0,5 = 0,625 \text{ м} \\m_{H(\text{доп})} &= 1,25 * 0,125 = 0,156 \text{ м}\end{aligned}$$

Приймаючи, що допустимі СКП містять в собі помилки визначення опорних точок та фотограмметричних робіт можемо записати:

$$\frac{m_{\text{доп}}}{3} = m_{\text{БПЛА}} = m_{\phi} + m_{\text{оп}} \quad (2.12)$$

Тепер потрібно перейти від допустимих СКП визначення контурів та відміток на топографічному плані до СКП визначення координат опорних точок. Враховуючи умови взаємозв'язку між максимально допустимими значеннями СКП та виміряним, можна записати наступне рівняння для визначення точності вимірювання координат опорних точок:

$$\begin{aligned}m_{\text{оп}} &= \frac{m_{\text{доп}}}{3} - m_{\phi} \\m_{XY(\text{оп})} &= \frac{0,625}{3} - 0,028 = 0,18 \text{ м} \\m_{H(\text{оп})} &= \frac{m_{\text{доп}}}{3} - 0,043 = 0,009 \text{ м}\end{aligned} \quad (2.13)$$

Розрахунок точності визначення опорних точок виконано за максимально жорсткими вимогами без врахування фактичної крутизни рельєфу. З урахування об'єкту знімання, цей розрахунок може бути уточнено щодо висотної складової помилки по допуску $\frac{1}{3} h_{\text{пер}}$.

З огляду на розраховані СКП визначення опорних точок запропоновано використання ГНСС методів визначення координат від пунктів постійно діючої ГНСС мережі в режимі RTK.

Для визначення координат опорних точок доцільно застосувати ГНСС-приймач, який забезпечує планову точність не гірше ніж $\pm 0,02 \text{ м}$ та висотну — не гірше ніж $\pm 0,03 \text{ м}$ у режимі RTK. Така точність відповідає вимогам до допустимих похибок і дозволяє отримати необхідну точність фотограмметричної моделі для визначення об'ємів земляних робіт.



Рис. 2.9. GNSS/RTK приймач Trimble R8S

2.4 Створення 3D моделі

У ході нашого дослідження для побудови цифрової тривимірної моделі місцевості використовувалося спеціалізоване програмне забезпечення — Agisoft Metashape, яке дозволяє здійснювати повний цикл обробки аерофотознімків: від імпорту зображень до побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР). За результатами польових робіт було отримано 94 знімки, які стали основою для створення 3D моделі досліджуваної ділянки.

Процес камеральної обробки аерофотознімків наступний:

1. Імпорт знімків (Add Photos)

Першим кроком стало створення нового проєкту в Agisoft Metashape і завантаження знімків. Програма автоматично зчитує метадані кожного зображення (координати GPS, фокусна відстань, розмір кадру тощо), що дозволяє виконати початкове геопросторове позиціонування камери.

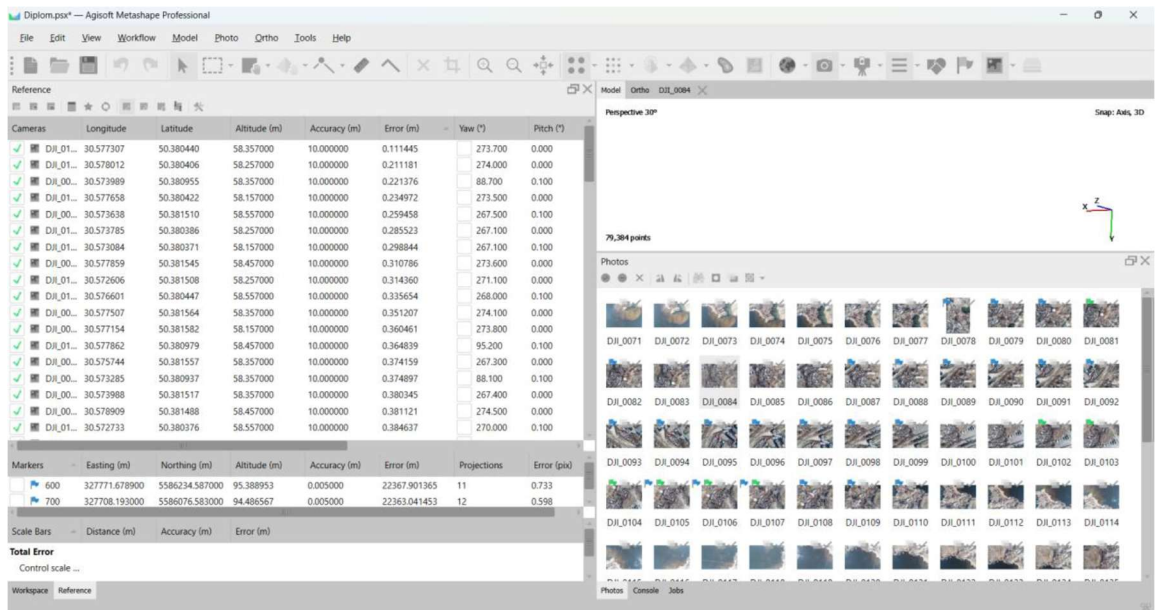


Рис. 2.10. Завантаження знімків у середовище Metashape

2. Вирівнювання знімків (Align Photos)

На другому етапі виконується вирівнювання знімків (Align Photos) — автоматичний процес, у ході якого програма:

- виконує пошук ключових точок на перекривних знімках;
- обчислює просторове положення камери для кожного кадру;
- формує розріджену хмару точок (Sparse Point Cloud), яка є базовим каркасом майбутньої 3D моделі.

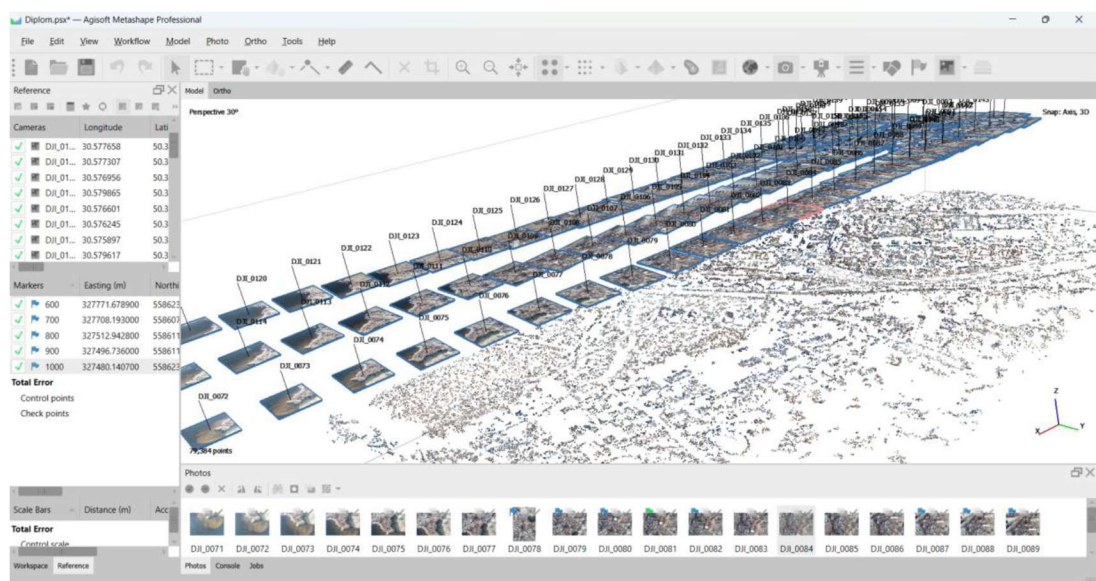


Рис. 2.11. Орієнтація камер у просторі після вирівнювання

У процесі вирівнювання забезпечено достатній рівень перекриття між знімками, що дозволило точно визначити просторове положення камер. Для оцінки точності використовуються середньоквадратичні похибки (RMSE) центрів знімання.

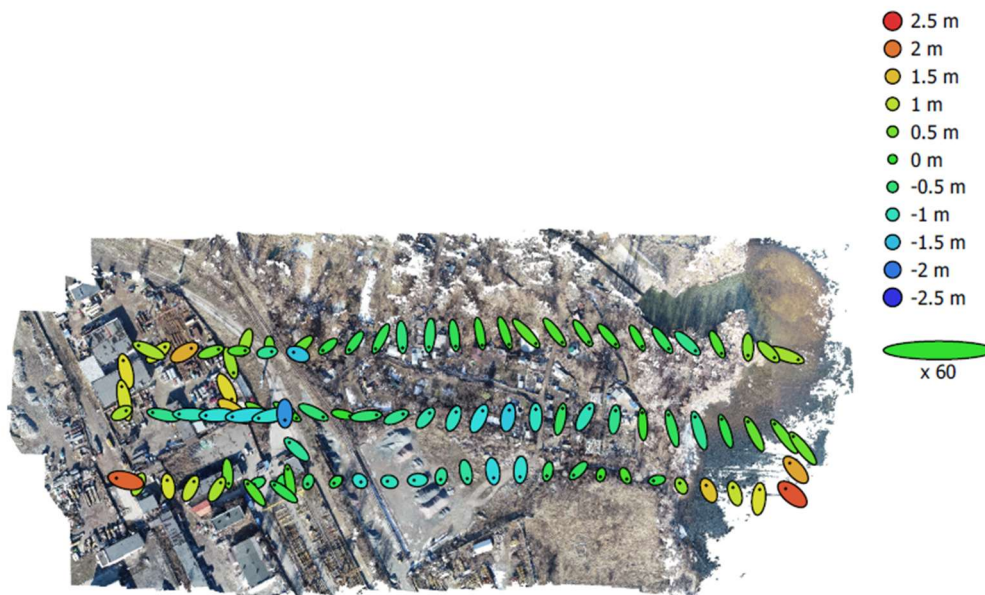


Рис. 2.12. Просторове розташування камер та оцінка похибок визначення їхніх положень

Z-похибка відображена кольором еліпсів, X і Y — формою. Оцінені положення камер позначені чорними точками.

Таблиця 2.4

Середньоквадратичні похибки калібрування камер

Похибка X (см)	Похибка Y (см)	Похибка Z (см)	Похибка XY (см)	Загальна похибка (см)
18.7407	23.2273	85.7271	29.845	90.7737

Отримані значення похибок відповідають типовим характеристикам вирівнювання ортофотознімків у проєктах з великою кількістю знімків та змінною висотою польоту. Вони є прийнятними для подальшої побудови моделі місцевості та цифрового ортофотоплану.

3. Калібрування камери (Camera Calibration)

Паралельно із вирівнюванням виконується внутрішнє калібрування камери (Camera Calibration).

Цей процес коригує спотворення, викликані оптикою (радіальні, тангенціальні), і дозволяє уточнити фокусну відстань та положення головної точки. Це забезпечує коректну геометрію при подальшому стереоаналізі та побудові моделі.

Camera Calibration

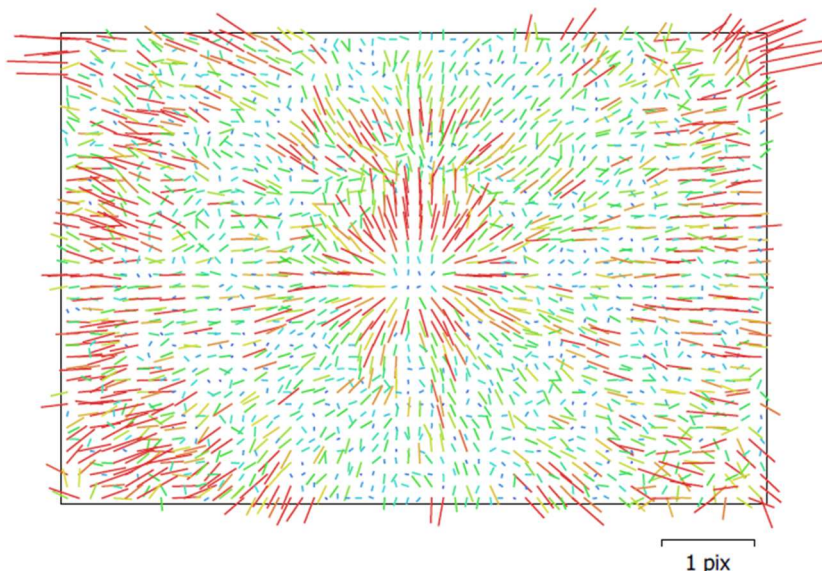


Рис. 2.13. Залишкові похибки калібрування камери

На рисунку 2.12 видно, що векторні похибки в центрі зображення мінімальні, тоді як біля країв та кутів – вони значно більші. Це свідчить про наявність типових радіальних та тангенціальних спотворень, характерних для ширококутних об'єктивів.

Таблиця 2.3

Калібрувальні коефіцієнти та кореляційна матриця.

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3600.17	5.3	1.00	0.20	0.78	-0.12	-0.66	0.83	-0.89	0.51
Cx	-2.17431	0.093		1.00	0.13	-0.04	0.14	0.17	-0.11	0.09
Cy	8.75204	0.11			1.00	-0.09	-0.51	0.64	-0.68	0.52
K1	-0.00417716	7.7e-05				1.00	-0.19	0.08	0.07	0.25
K2	-0.00930773	8.3e-05					1.00	-0.96	-0.59	-0.36
K3	0.00889086	9.4e-05						1.00	-0.74	0.43

P1	-0.00232124	3.9e-06							1.00	-0.47
P2	0.000827247	2.1e-06								1.00

У таблиці 2.3 значення коефіцієнтів спотворення K1, K2, K3, а також тангенціальні компоненти P1 і P2 не є нульовими, що підтверджує наявність оптичних спотворень. Помилки (Error) фокусної відстані (F) та координат головної точки (Cx, Cy) знаходяться на прийнятному рівні, що свідчить про достатньо точну калібровку камери.

4. Розміщення опорних точок (Markers/GCPs)

Для підвищення точності прив'язки моделі до координатної системи в подальших етапах за потреби додаються опорні точки (Ground Control Points). Вони імпортуються або створюються вручну, і розміщуються на зображеннях за допомогою інструмента Markers.

Ці точки використовуються для:

- уточнення масштабування моделі;
- підвищення точності по висоті;
- зменшення глобальної похибки при побудові ЦМР.



Рис. 2.14. Розміщення опорних точок

Точність проставлення опорних точок

Ground Control Points

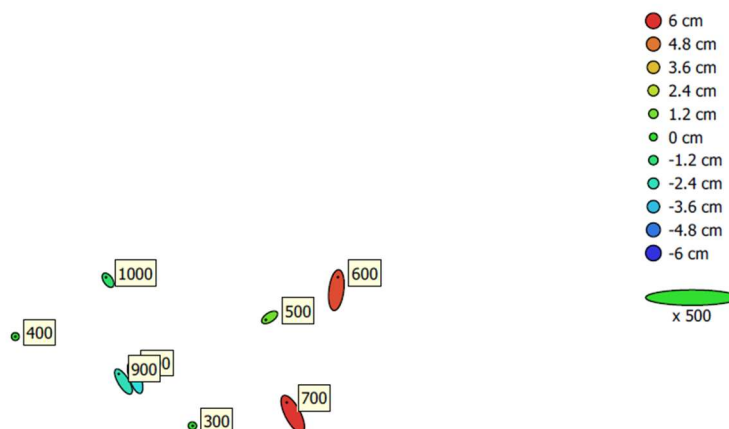


Рис. 2.15. Розташування опорних точок та оцінка похибок

Помилка Z відображається кольором еліпса. Помилки X та Y відображаються формою еліпса. Орієнтовні місця GCP позначені крапкою або перехрестям.

Середньоквадратичні похибки (RMSE — Root Mean Square Error) визначені за результатами обробки контрольних точок у програмному середовищі Agisoft Metashape.

У таблиці 2.4 наведені відповідні значення похибок для координат X , Y , Z , а також сумарна помилка в площині (XY) та загальна просторово-прив'язана похибка.

Таблиця 2.4

Середньоквадратичні похибки контрольних точок (GCP)

Кількість точок (Count)	Похибка X (см)	Похибка Y (см)	Похибка Z (см)	Похибка XY (см)	Загальна похибка (см)
8	1.70278	3.88038	3.21557	4.23755	5.31947

Отримані значення свідчать про те, що точність проставлення опорних точок відповідає вимогам нормативних документів, а також міжнародним стандартам точності для фотограмметричних робіт. Похибки у межах 2–3 см є типовими та допустимими для задач великомасштабного картографування та геодезії.

5. Побудова щільної хмари точок (Build Dense Cloud)

Після формування розрідженої хмари виконується побудова щільної хмари точок (Build Dense Cloud). На цьому етапі для кожного пікселя, що має відповідність на інших знімках, обчислюється положення у просторі.

Щільна хмара — це мільйони тривимірних точок, які детально описують поверхню місцевості. Саме ця хмара використовується для побудови подальших моделей.

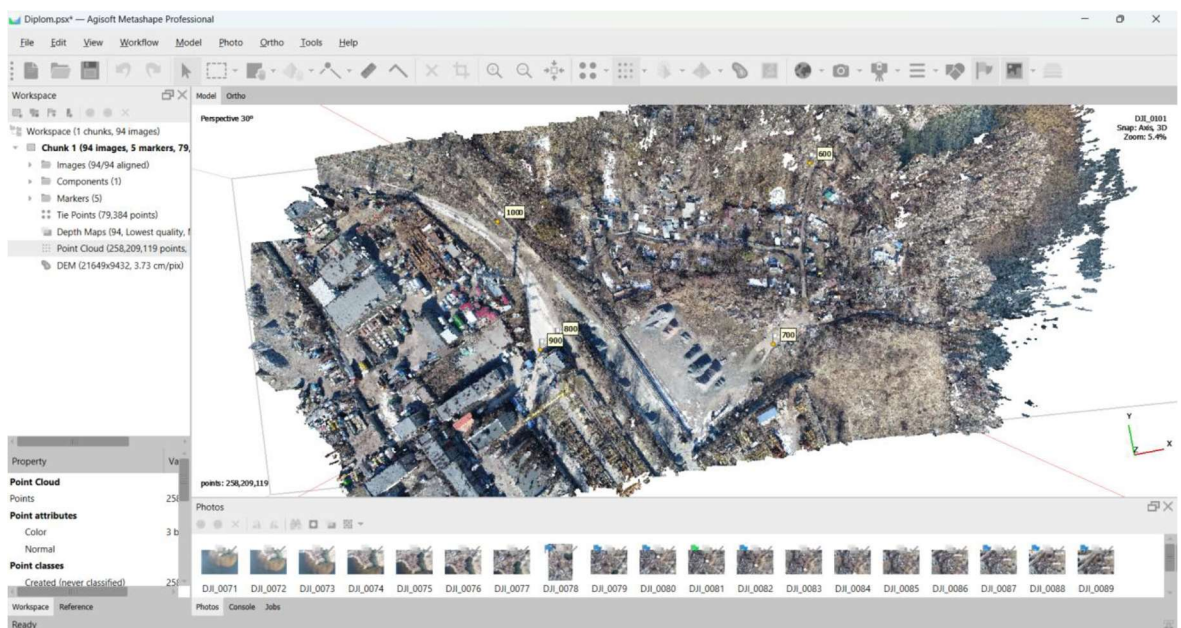


Рис. 2.16. Щільна хмара точок

6. Побудова цифрової моделі рельєфу (Build DEM)

На основі щільної хмари точок створюється цифрова модель рельєфу (Digital Elevation Model, DEM). Це модель «голої» поверхні землі — без рослинності, будівель та інших об'єктів, що виступають над рельєфом.

Переваги ЦМР:

- дозволяє побудувати профілі, визначити ухили та перепади висот;

- використовується як основа для гідрологічного аналізу, проєктування та розрахунку об'ємів;
- забезпечує точне представлення топографії місцевості.



Рис. 2.17. Цифрова модель рельєфу

7. Виокремлення насипу (Select Area / Draw Polygon)

Однією з головних цілей моделювання було виокремлення штучного елемента рельєфу — насипу, для якого в подальшому здійснюється обчислення об'єму.

Процес виокремлення включає:

- Виділення ділянки на моделі інструментом Draw Polygon;
- Створення нової класифікації або шару, який містить тільки точки, що відповідають межам насипу;
- Обрізання фрагмента моделі (Сгор) для подальшого аналізу.

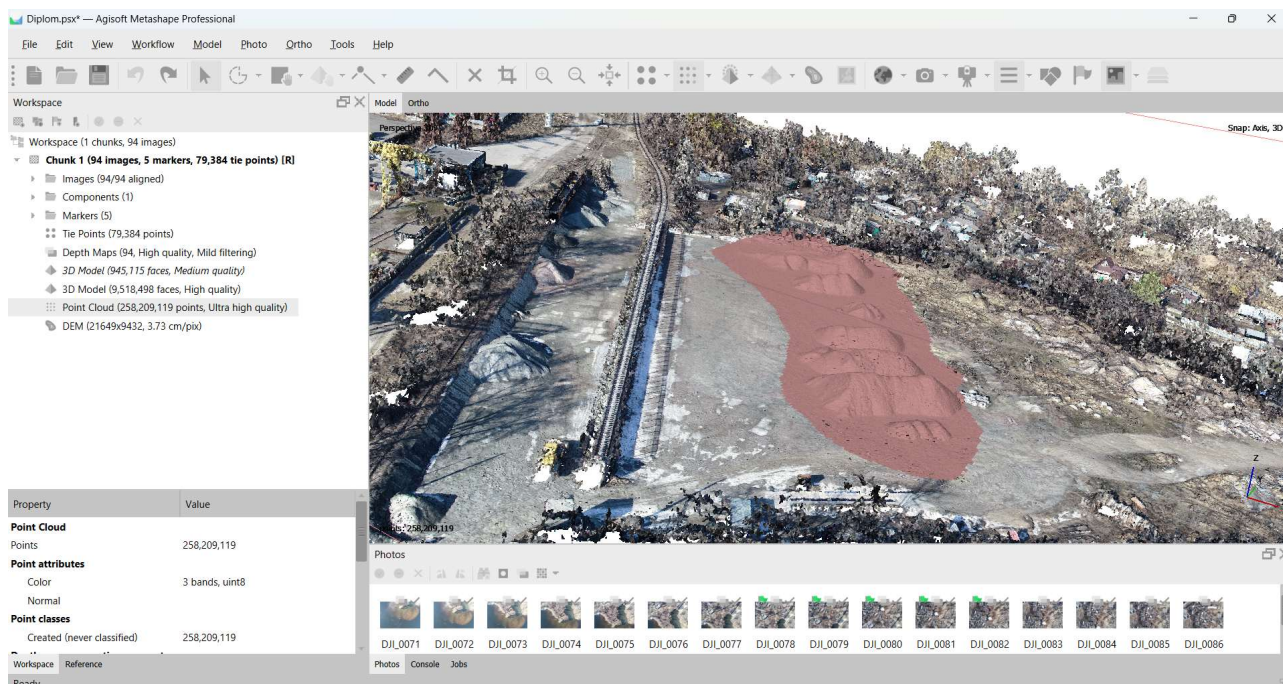


Рис. 2.18 Виділений контур насипу по моделі

Характеристика насипу

На основі просторових даних, отриманих із моделі, визначено наступні характеристики насипів:

Загальна довжина насипу — близько 100 м;

Середня ширина в основі — 30 м;

Максимальна висота — до 4 м;

Площа основи — близько 1800 м²;

Форма — подовжена, з асиметричним профілем (один бік має крутіший схил).

Насипи, найімовірніше, утворено внаслідок підготовчих робіт — можливо, для укріплення майданчику, прокладання шляху або як технологічний насип під інженерну споруду.

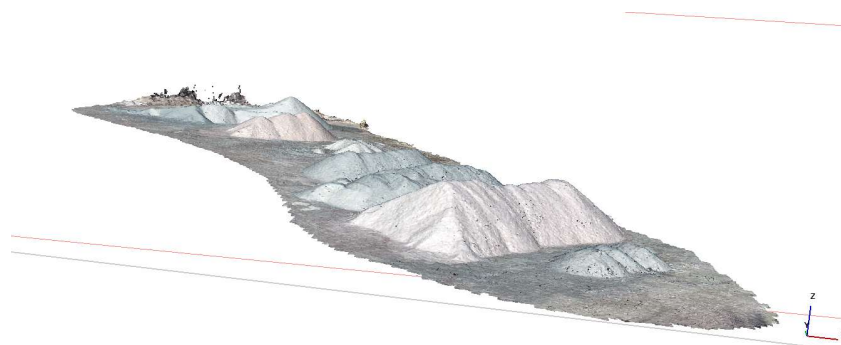


Рис. 2.19. 3D вигляд насипу після обрізки

2.5 Обрахунок об'ємів насипу

Розрахунок об'єму насипів буде виконуватись в пз CloudCompare.

CloudCompare — це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, призначене для обробки та аналізу тривимірних хмар точок. Програма широко використовується в геодезії, фотограмметрії, археології та інших галузях, де необхідна точна 3D-візуалізація та аналіз просторових даних. CloudCompare дозволяє виконувати порівняння хмар точок, вирівнювання, вимірювання об'ємів, створення цифрових моделей рельєфу, а також працювати з файлами різних форматів (наприклад, LAS, PLY, OBJ). Інтерфейс програми підтримує масштабування, фільтрацію, сегментацію та інші інструменти для зручної роботи з просторовими даними.

У CloudCompare об'єм можна розраховувати відносно константної горизонтальної площини або між двома поверхнями — базовою (наприклад, рельєф до початку робіт) та верхньою (модель насипу).

Для цього обидві моделі (насипу та базової поверхні) були імпортовані до CloudCompare через команду File → Open.

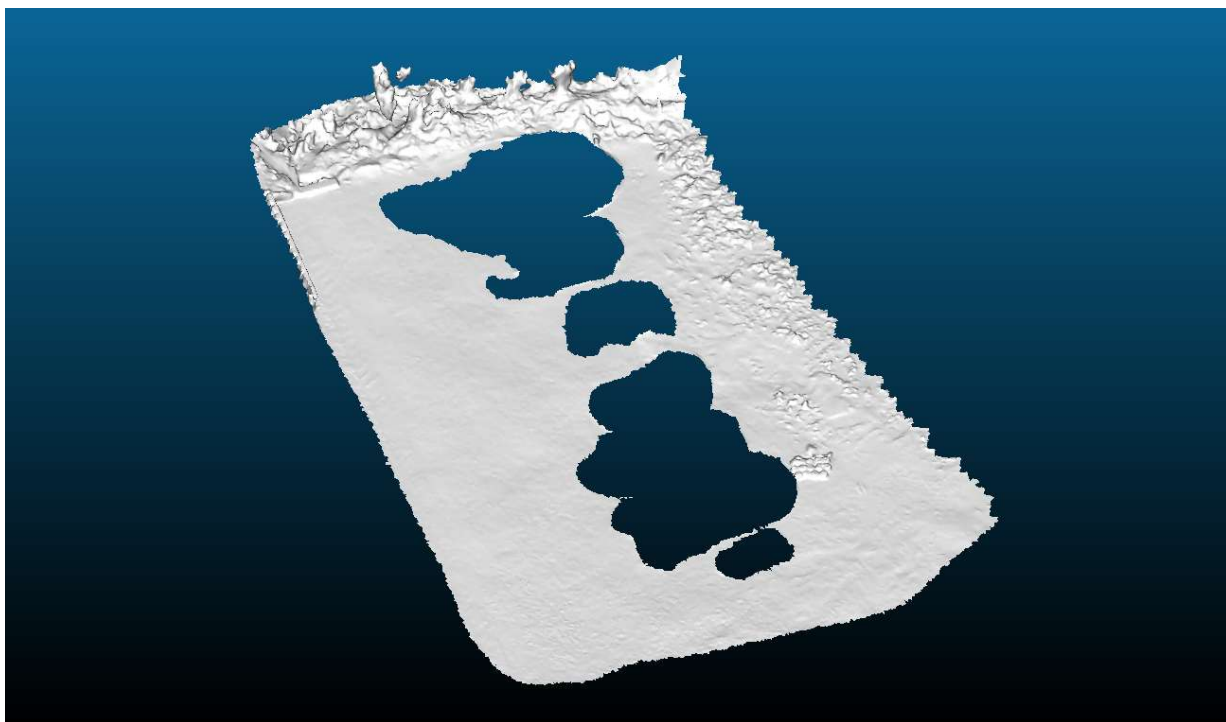


Рис. 2.20. Завантажена 3D-модель базової поверхні (землі) у CloudCompare

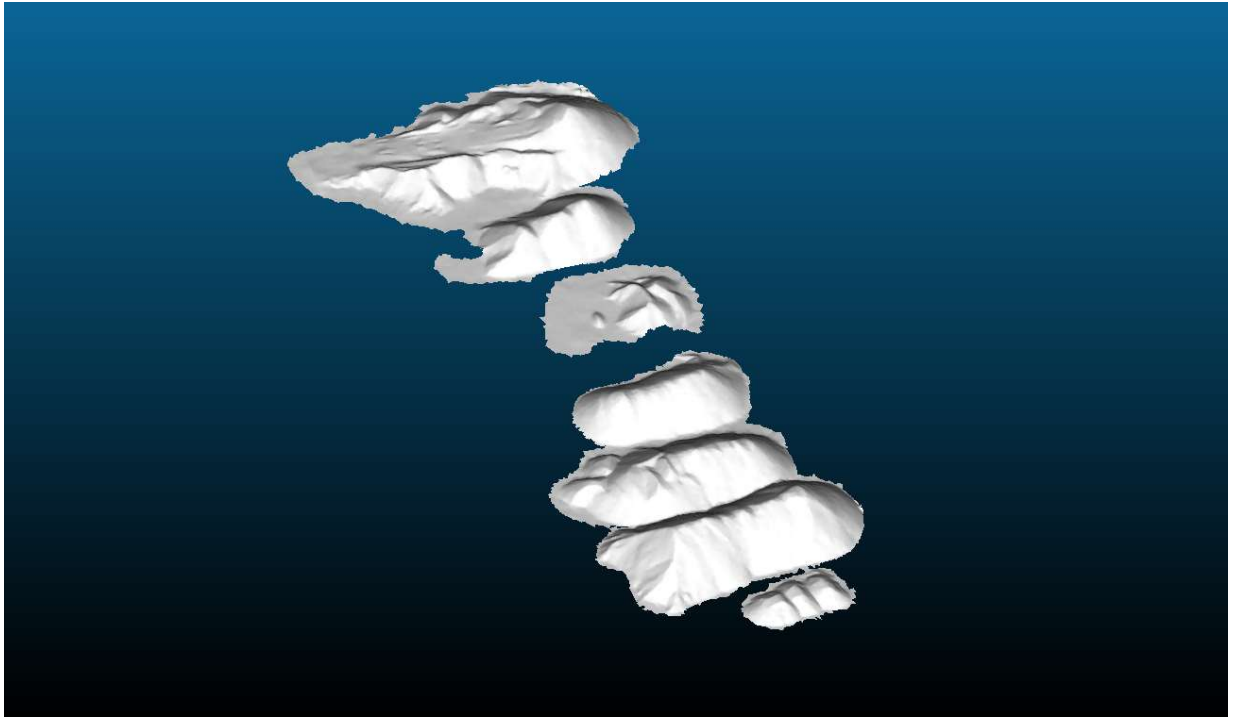


Рис. 2.21. Завантажена 3D-модель насипів у CloudCompare

Для визначення об'єму між двома поверхнями використовувався інструмент Volume:

Tools → Volume → 2.5D Volume.

Налаштування:

Ground/Before — обрана базова поверхня (рельєф до насипу);

Cell/After — модель насипу;

Grid step — обрано відповідний крок сітки (наприклад, 1 м);

Projection axis — Z (по вертикалі);

Натискаємо Compute для запуску обчислення.

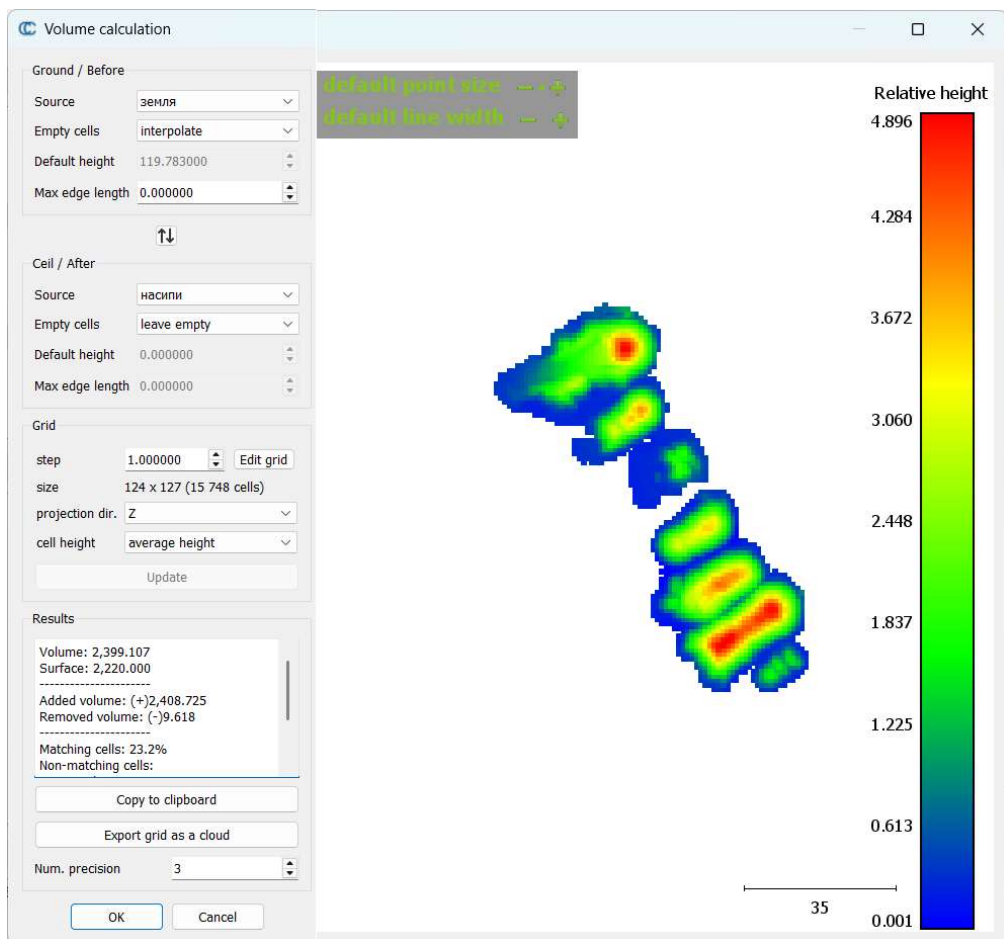


Рис. 2.22. Обчислення об'єму між моделлю насипу та поверхнею землі

Результати обрахунку:

Volume: 2399.107

Surface: 2220.000

У результаті розрахунків об'єм насипу становить 2399,107 кубічних метрів, а площа поверхні, на якій розташовано насип, — 2 220,000 квадратних метрів.

Застосування інструменту 2.5D Volume у CloudCompare на основі двох 3D-моделей у форматі OBJ дозволило отримати точні об'єми насипу.

Такий підхід є надійним для інженерно-геодезичних задач і дає змогу швидко аналізувати зміни рельєфу внаслідок земляних робіт.

Розрахунок точності об'єму насипу

$$V = H * L * B = H * S \quad [2.14]$$

Де, V – Об'єм насипу, m^3

H – Висота насипу, m

L – Довжина насипу, m

B – Ширина насипу, м

S – Площа основи насипу, м²

$$m_v = \sqrt{m_h^2 * S^2 + m_s^2 * H^2} \quad [2.15]$$

Де, m_s – m_{xy}, похибка в плані, м

m_h – m_z, похибки по висоті, м

$$S = L \cdot B = 120,0 \cdot 18,5 = 2222,000 \text{ м}^2$$

$$V = H \cdot S = 1,08 \cdot 2222,000 = 2399,107 \text{ м}^3$$

$$m_v = \sqrt{0.0322^2 * 2222.000^2 + 0.0424^2 * 1,08^2} = 68,5 \text{ м}^2$$

$$\delta = \frac{68,5}{2399,107} * 100 = 2.35\%$$

Відносна похибка $\approx 2,35\%$

Розрахунок об'ємів за матеріалом насипу

У процесі створення цифрової моделі території було ідентифіковано та проаналізовано 7 окремих насипів. За допомогою фотограмметричної обробки та аналізу тривимірної геометрії було розраховано площу основи та об'єм кожного насипу. Результати розрахунків наведено нижче:



Рис. 2.23 Насип №1

Насип 1 — Вапняковий щебінь

Площа: 680 м²

Об'єм: 769 м³

Матеріал: Вапняковий щебінь (світло-сірого кольору)

Призначення: Застосовується в дорожньому будівництві, для ущільнення основ



Рис. 2.24 Насип №2

Насип 2 — Гранітний щебінь

Площа: 272 м²

Об'єм: 269 м³

Матеріал: Гранітний щебінь (рожево-червоного відтінку)

Призначення: Основний матеріал для бетонних сумішей, підсипки під фундаменти



Рис. 2.25 Насип №3

Насип 3 — Митий пісок

Площа: 225 м²

Об'єм: 97 м³

Матеріал: Митий пісок (світло-бежевого кольору)

Призначення: Використовується для кладки, штукатурки, виготовлення розчинів.



Рис. 2.26 Насип №4

Насип 4 — Відсів (гравій)

Площа: 303 м²

Об'єм: 359 м³

Матеріал: Відсів або дрібний гравій (сірого кольору)

Призначення: Для створення підоснови дорожнього покриття, дренажних шарів.



Рис. 2.27 Насип №5

Насип 5 — Базальтовий щебінь

Площа: 363 м²

Об'єм: 559 м³

Матеріал: Темно-сірий базальтовий щебінь

Призначення: Будівництво доріг, зміцнення укосів, залізнична підсипка.



Рис. 2.28 Насип №6

Насип 6 — Гранітний щебінь (великий об'єм)

Площа: 473 м²

Об'єм: 858 м³

Матеріал: Гранітний щебінь крупної фракції

Призначення: Для важких конструкцій, як баласт, або у великих промислових проєктах.



Рис. 2.29 Насип №7

Насип 7 — Відсів або цементна суміш

Площа: 120 м²

Об'єм: 62 м³

Матеріал: Дрібний відсів або цементна суміш (дуже світлого кольору)

Призначення: Можливо використовується як наповнювач або основа для сумішей.

РОЗДІЛ 3. ВИТРАТИ НА ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Організація геодезичних робіт

Організація геодезичних робіт включає послідовне планування, підготовку, виконання та обробку геодезичних вимірювань із забезпеченням їхньої точності, достовірності та відповідності вимогам чинних нормативних документів.

Етапи виконання робіт:

1. Підготовчий етап:

вивчення технічного завдання;

аналіз вихідної картографічної та кадастрової інформації;

рекогностування ділянки;

у разі потреби погодження польових робіт з державними службами.

2. Польовий етап:

закладання геодезичних опорних пунктів (GCP);

визначення координат і висот пунктів із використанням GNSS-обладнання в режимі RTK або статики;

проведення аерофотозйомки БПЛА за заздалегідь розробленим польотним планом.

3. Камеральний етап:

обробка отриманих знімків у програмному середовищі Agisoft Metashape;

побудова цифрової моделі місцевості;

визначення об'ємів насипу за допомогою хмари точок у CloudCompare;

оформлення технічного звіту.

Організація робіт повинна враховувати технічні, економічні та часові ресурси. Важливою умовою є контроль якості даних на кожному етапі: перевірка точності GNSS-вимірювань, точності ортофотоплану та відповідності моделі реальному рельєфу.

3.2 Кошторис на виконання робіт

Формування кошторису на виконання геодезичних робіт базується на нормативних цінах, що враховують витрати часу, заробітну плату, амортизацію обладнання, транспортні витрати, витратні матеріали та інші складові.

Для оцінки вартості робіт використовуються орієнтовні показники з урахуванням методики, викладеної у Збірнику цін на топографо-геодезичні роботи (затвердженому Державним комітетом України по земельних ресурсах), з поправками на використання новітніх технологій.

Розрахунок витрат виконується для визначення вартості геодезичного забезпечення об'єкта та включає:

Таблиця 2.5.

Кошторис

№	Вид робіт	Одиниця виміру	Кількість	Вартість за одиницю (грн)	Сума (грн)	Джерело (збірник/розділ)
1	Закладання опорних геодезичних точок	пункт	6	500	3000	ЗЦТГР, Розд. 1, табл. 1.1
2	GNSS - спостереження	година	4	800	3200	ЗЦТГР, Розд. 2, табл. 2.4
3	Підготовка маршруту польоту	комплект	1	1500	1500	Орієнтовно, за проектною нормою

4	Аерофотозйомка БПЛА	га	7	1000	7000	ЗЦТГР, Розд. 8, табл. 8.2
5	Камеральна обробка фотознімків	робота	1	4000	4000	ЗЦТГР, Розд. 9, табл. 9.1
6	Побудова 3D моделі, обрахунок об'єму	робота	1	2500	2500	Орієнтов но, згідно ПЗ обробки
7	Оформлення технічної документації	комплек т	1	2000	2000	ЗЦТГР, Розд. 10, табл. 10.2
Раз ом:					23200,00	

ПДВ – 20% = 4640,00 грн

Загальна сума : 27840,00 грн

Загальна сума прописом : двадцять сім тисяч вісімсот сорок гривень 00 копійок

3.3. Техніка безпеки

При виконанні геодезичних робіт, особливо із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), важливе значення має дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки. Це забезпечує збереження життя та здоров'я працівників, а також безперебійне виконання проектних завдань.

Загальні вимоги охорони праці

Геодезичні роботи проводяться згідно з вимогами Закону України «Про охорону праці», ДБН В.1.3-2:2010 «Геодезичні роботи у будівництві», та інших чинних нормативно-правових актів. До початку виконання робіт кожен виконавець повинен пройти:

- вступний інструктаж;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- повторний інструктаж (не рідше одного разу на 6 місяців).

Працівники повинні мати засоби індивідуального захисту (каски, жилети, захисні окуляри, рукавички), а також носити яскраве сигнальне спорядження при роботі поблизу доріг або техніки.

Заходи безпеки під час польових робіт

Під час виконання польових геодезичних робіт необхідно дотримуватись наступних вимог:

- не працювати в умовах недостатньої видимості (туман, сильний дощ, темна пора доби без освітлення);
- уникати розташування поблизу ЛЕП, залізничних колій, стрімких схилів і будівельних майданчиків без спеціального дозволу;
- не працювати одному в ізольованих місцях — обов'язкова наявність напарника або засобів зв'язку;
- при русі по складній місцевості — використовувати взуття з протиковзкою підошвою та дотримуватись маршрутів.

Техніка безпеки при використанні БПЛА

Робота з безпілотними літальними апаратами супроводжується додатковими ризиками, пов'язаними з польотами, обладнанням та повітряним простором. Тому обов'язковими є такі заходи:

1. Підготовка:

Ознайомлення з інструкцією користувача дрону;

Попередня перевірка технічного стану БПЛА, заряд акумуляторів, калібрування;

Вибір ділянки польоту з урахуванням чинної Карти обмежень повітряного простору України та погодження у разі потреби.

2. Під час польоту:

Зона польоту має бути в межах прямої видимості (режим VLOS);

Максимальна висота польоту — не більше 120 м;

Заборонено польоти над скупченням людей, автошляхами, електромережами, стратегічними об'єктами;

Заборонено працювати в умовах сильного вітру, дощу, грози;

Оператор повинен завжди контролювати положення БПЛА та бути готовим до аварійного приземлення.

3. Після польоту:

Обов'язкова перевірка цілісності пристрою;

Аналіз польотного журналу (log file) на предмет збоїв або помилок;

Передача даних для подальшої обробки тільки після завершення усіх процедур безпеки.

Надзвичайні ситуації

Під час виконання геодезичних робіт можуть виникати наступні надзвичайні ситуації:

1. Втрата зв'язку з дроном.

- Причини: радіоперешкоди, збої в програмному забезпеченні, недостатній рівень заряду батареї.
- Дії: активувати функцію повернення на базу (RTH), спостерігати за напрямком польоту, при потребі виконати аварійну посадку.

2. Падіння дрону.

- Причини: механічна несправність, зіткнення з перешкодою, втрата GPS.
- Дії: визначити місце падіння, переконатися у відсутності постраждалих, зафіксувати інцидент, оцінити пошкодження обладнання.

3. Загроза травмування людини.

- Причини: запуск дрону поблизу осіб, несподіване зниження висоти, обертання гвинтів.
- Дії: негайно вимкнути двигуни, надати першу допомогу, викликати екстрені служби.

4. Порухення повітряного простору.

- Причини: польоти поблизу заборонених зон або аеропортів без дозволу.

- Дії: зупинити політ, повідомити керівника робіт, оцінити ризики відповідальності.

У всіх випадках надзвичайних ситуацій необхідно:

- негайно припинити роботу;
- повідомити керівника робіт;
- за потреби — викликати швидку допомогу;
- зафіксувати обставини події у журналі інцидентів.

Дотримання вимог техніки безпеки під час геодезичних робіт є запорукою збереження здоров'я персоналу, надійного функціонування обладнання та успішного виконання виробничого завдання.

ВИСНОВОК

У цій атестаційній випускній роботі було проведено комплексне дослідження методики визначення об'ємів земляних мас за допомогою фотограмметрії та даних, отриманих із БПЛА. Опрацьовано етапи створення геодезичної опорної мережі, виконання аерофотознімання, побудови цифрової моделі рельєфу та розрахунку об'єму техногенного насипу. Результати обробки дозволили встановити, що об'єм досліджуваного об'єкта становить 2399,107 м³ площа насипу дорівнює 2,220.000 м²

Використання сучасного обладнання та програмного забезпечення (зокрема CloudCompare, Agisoft Metashape) продемонструвало високу ефективність методики: високу точність, оперативність отримання результатів і мінімальні затрати при великому обсязі робіт.

Отримані просторові моделі та числові дані можуть бути використані для:

- інженерно-будівельного планування (визначення обсягів вивезення ґрунту, проектування основи під забудову);
- моніторингу змін рельєфу на техногенних або рекультивованих територіях;
- контролю підрядників у ході земляних робіт;
- створення ГІС-баз даних місцевості для промислових зон;
- екологічного аналізу впливу на довкілля.

Перспективами розвитку обраної тематики є інтеграція з лазерним скануванням (LiDAR), автоматизація побудови моделей та використання хмарних сервісів для обробки великих обсягів просторових даних.

Список літератури

1. Білоус В.В., Боднар С.П. Фотограмметрія. Навчальний посібник. – К.: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2021. – 137 с.
2. Богуслаєв В. О. [та ін.]. Сучасні безпілотні авіаційні комплекси [Текст] : навч. посіб. / Нац. ун-т "Запоріж. політехніка". – Запоріжжя : Мотор Січ, 2022. – 212 с. : рис. – Бібліогр.: с. 203–212. – 300 прим. – ISBN 978-966-2906-97-4
3. ДБН В.1.3-2:2010 "Геодезичні роботи у будівництві".
4. ДСТУ ISO 17123-8:2018 «Оптичні та електронні прилади для вимірювань у польових умовах. Частина 8: GNSS-прилади».
5. Дорожинський О.Л. Основи фотограмметрії: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003
6. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність».
7. ГКНТА 2.04-02-98 «Інструкція з топографічного знімання масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000 і 1:500».
8. Застосування БПЛА у військовій справі та аерозніманні [Текст] : монографія / В. М. Глотов [та ін.] ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Видавництво Львів. політехніки, 2022. – 194 с. : рис., табл. – Бібліогр. в кінці розд. – 200 прим. – ISBN 978-966-941-700-8
9. Іванова Л.І., Єгоров О.І. Основи фотограмметрії. Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2002. – 156 с.
10. Катушков В.О., Денисюк Б.І. Технологія оброблення растрової інформації на цифровій фотограмметричній станції. Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2017.
11. Тимчасовий порядок використання повітряного простору України, 31.05.2018.
12. Aber, J. S., Marzloff, I., & Ries, J. B. Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications. – Amsterdam, The Netherlands, 2010. – 266 p.
13. Dayamit, O. M., Pedro, M. F., Ernestoa, R. R., & Fernandoa, B. L. DIGITAL ELEVATION MODEL FROM NON-METRIC CAMERA IN UAS COMPARED WITH LIDAR TECHNOLOGY. – GEOCUBA Investigación y Consultoría, 2015.
14. Šašak, J., Gallay, M., Kaňuk, J., Hofierka, J., & Minár, J. Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry in Mapping Alpine Terrain. – Institute of Geography, Faculty of Science, Pavol Jozef Šafárik University in Košice, 2019.
15. Yu, J. J., Kim, D. W., Lee, E. J., & Son, S. W. Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models. – Korea Environment Institute, 2020.

ДОДАТКИ