

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ ТА ТУРИЗМУ  
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ І ГЕОІНФОРМАТИКИ

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Освітнього ступеня «Магістр»

на тему: “ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ’ЄМІВ ЗЕМЛЯНИХ РОБІТ ЗА  
АЕРОЗНІМКАМИ З БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ”

Виконав: студент гр. ЗВ-52  
Спеціальності 193 Геодезія і землеустрій  
(шифр і назва)  
Т. І. Загоровський  
(Прізвище та ініціали)

Керівник: І.З. Колб  
(Прізвище та ініціали)

Рецензенти: \_\_\_\_\_  
(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024





## УДК 528.74 Застосування фотограмметрії

Технологія визначення об'ємів земляних робіт за аерознімками з безпілотного літального апарату. Загоровський Тарас Ігорович. Магістерська кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет природокористування, 2024, – 64 с. текстової частини, 3 таблиці, 28 рисунків, 25 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі викладено наукові положення виконання інженерно-геодезичних вишукувань методами фотограмметрії, подано методологічні основи фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання будівельного майданчика з використанням БПЛА оснащених високоточними ГНСС обладнанням, а також створено цифрову модель рельєфу для розрахунку об'ємів земляних робіт двох черг будівництва логістичного центру в с. Малехів Львівської області. Наведено створені картограми земляних робіт та відомості розрахунку об'ємів земляних мас.

Розглянуті питання охорони довкілля.

**Ключові слова:** *інженерно-геодезичні вишукування, аерознімання з БПЛА з підтримкою RTK/PPK, цифрова модель котлована, визначення об'ємів земляних робіт.*

## ЗМІСТ

Вступ.... стор.5

1. Аерознімання для інженерно – геодезичних вишукувань.

1.1. Інженерно – геодезичні вишукування для будівництва та роль в них фотограмметричних технологій.... стор.7

1.2. Фотограмметрична технологія на основі аерознімання об'єктів будівництва з безпілотних літальних апаратів.... стор.10

1.3. Особливості фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання з БПЛА для інженерно – геодезичних вишукувань.... стор.19

2. Аналіз методик визначення об'ємів земляних робіт за даними аерознімання.

2.1. Загальні принципи геоінформаційного моделювання поверхні рельєфу.... стор.29

2.2. Математичні моделі визначення об'ємів земляних робіт.... стор.32

3. Визначення об'ємів земляних робіт на будівельному майданчику в с.Малехів Львівського району за аерознімками з безпілотного літального апарату.

3.1.Об'єкт дослідження.... стор.39

3.2. Вихідні дані та матеріали.... стор.42

3.3. Методика фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання будівельного майданчика.... стор.48

3.4. Визначення об'ємів насипів та котлованів.... стор.52

4. Охорона довкілля.... стор.57

Висновки та пропозиції.... стор.61

Бібліографічний список.... стор.62

## Вступ

Як джерело даних при виконанні інженерно-геодезичних вишукувань дедалі частіше застосовуються матеріали аерознімання. Найбільш досконалі моделі безпілотників оснащуються високоточними модулями визначення місцеположень глобальними навігаційними супутниковими системами. Це дає змогу значно скоротити тривалість виконання робіт, спростити і автоматизувати технологію геоприв'язування фотограмметричних моделей при збереженні їх об'єктивності, високої просторової точності і детальності. Автоматизація збору даних і введення їх в комп'ютерні системи аналітичного опрацювання дозволяє знизити кількість помилок і дає можливість оперативно виконувати вишукування на потребу будівельної галузі. Актуальним завданням при цьому стає розробка способів ефективного вилучення з множини аерознімків корисної інформації для вирішення завдань зйомок, обмірів, формування технічної документації тощо.

Основна мета кваліфікаційної роботи – дослідити можливості використання даних прямого інструментального геоприв'язування отриманих з безпілотника аерознімків при здійсненні виконавчих знімачь проміжних етапів будівництва. В роботі поставлені наступні завдання: виконати аерознімання будівельного майданчика в процесі облаштування котлованів з допомогою квадрокоптера оснащеного високоточною апаратурою ГНСС, побудувати цифрову модель рельєфу, виконати оцінку об'єму вийнятих земляних мас, побудувати картограму земляних робіт з використанням спеціального програмного забезпечення.

Завданням даної кваліфікаційної роботи є систематизація знань в галузі фотограмметрії і інженерної геодезії, здійснення опрацювання матеріалів аерознімання будівельного майданчика з БПЛА з прямою геоприв'язкою, дослідження методу створення технічної документації для фіксації результатів

земляних робіт, створення картограм земляних робіт і відомостей для розрахунку об'ємів земляних мас.

Об'єкт дослідження є технологія розрахунку об'ємів земляних мас із створенням відповідної технічної документації на основі даних і матеріалів аерознімання будівельного майданчика з безпілотного літального апарата, оснащеного модулем ГНСС RTK/PPK.

Предметом дослідження є майданчик нового будівництва виробничо-складського комплексу з приміщеннями громадського призначення на земельній ділянці кадастровий номер 4622785700:03:001:0255 на вулиці Київській в с. Малехів Львівського району Львівської області.

Методи досліджень: порівняльний літературний огляд аналогічних робіт в галузі застосування БПЛА з прямою геореференцією.

Практичне значення одержаних результатів полягає у підтвердженні високої ефективності БПЛА для оперативного збору високоточних геоданих при здійсненні інженерно-геодезичних вишукувань у будівництві.

## **1. Аерознімання для інженерно – геодезичних вишукувань**

### **1.1. Інженерно – геодезичні вишукування для будівництва та роль в них фотограмметричних технологій**

Інженерні вишукування для будівництва за положеннями Закону України "Про наукову та науково-технічну діяльність" є видом науково-технічної діяльності, що забезпечує вивчення існуючих умов і ситуації на територіях (ділянках) об'єктів будівництва [5]. В першу чергу інженерно-геодезичні вишукування слід розглядати як окремий вид геодезичних робіт, спрямованих на збору повних та достовірних топографо-геодезичних даних. Це дані про ситуацію, існуючі наземні та підземні споруди, існуючі на місцевості пункти опорних і розмічувальних геодезичних мереж та інформація про рельєф місцевості в зоні проведення робіт. Всі ці дані необхідні для розробки проектних рішень, виконання будівельно-монтажних робіт, контрольних, виконавчих знімачь [2]. Ці вишукування можна здійснити як традиційними геодезичними і фотограмметричними методами так і новими методами такими як аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземне та повітряне лазерне сканування тощо.

Широкого поширення набуває застосування фотограмметрії — науки, що займається визначенням положення, форми, розмірів, а також кількісних і якісних характеристик об'єктів через вивчення їх фотографічних зображень та інших дистанційно (неконтактно) отримуваних даних знімачь. Інженерна фотограмметрія - галузь фотограмметрії, що досліджує теорію, методи та технології вирішення інженерних завдань за допомогою фотографічних зображень [6], хмар точок відбиття лазерного та радарного опромінення об'єктів тощо.

Методи інженерної фотограмметрії характеризуються високою продуктивністю виконання робіт за рахунок в першу чергу скороченням тривалості польових робіт. Ці методи відрізняються інформативністю,



об'єктивністю, актуальністю, безпечністю. Можливість виконувати вимірювання дистанційно, в стислі терміни, об'єктивними засобами знімань також є позитивною особливістю. Фотограмметричні зйомки — це сукупність геодезичних, знімальних (фотографічне знімання, лазерне і радарне знімання) робіт а також аналітичного опрацювання отриманих даних за спеціальними фотограмметричними алгоритмами. Опрацювання має на меті отримання кількісних та якісних характеристик об'єктів шляхом створення каталогів координат, цифрових моделей місцевості, топографічних карт і планів, профілів рельєфу тощо.

Типовими завданнями, що розв'язуються за допомогою інженерної фотограмметрії у будівництві є:

- контроль форм і розмірів об'єктів;
- спостереження за деформаціями конструкцій;
- виконання виконавчих знімань на етапах завершення черг будівельних робіт, зокрема поточного і підсумкового обміру об'ємів земляних робіт, точності монтажних робіт тощо;
- проведення архітектурних обмірів будівель, складання ортогональних чи фронтальних планів об'єктів для їх реконструкції або реставрації.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають важливим інструментом для геодезистів, інженерів і науковців, оскільки кількість доступних економічно ефективних та зручних у використанні систем швидко зростає. Ці платформи пропонують привабливу альтернативу для картографування локальних за площею територій і виконання завдань інженерної геодезії з точністю на рівні перших одиниць сантиметрів. В спеціальній літературі повідомляється про численні успішні застосування: повторювані обстеження будівель, цивільних інженерних споруд або будівельних майданчиків, а також моніторинг земель та інфраструктури [14].

В цифровій аерогеодезії, яка реалізує сучасні фотограмметричні технології, застосовується методика вибору параметрів аерознімання для

визначення координат точок місцевості за аерознімками з подальшим створенням з цих точок цифрових моделей місцевості і об'єктів а також отримання планово-картографічної основи для будівельної сфери. Методика націлена на застосування автоматизованого стереофотограмметричного опрацювання аерознімків з отриманням просторових координат точок місцевості.

Зазвичай реалізація фотограмметричної технології полягає в здійсненні аерознімання за попередньо складеним планом польоту та подальшому опрацюванні записаних даних для створення продуктів, пов'язаних з поверхнею, таких як 3D моделі та ортофотознімки, як показано на рис.1.1.

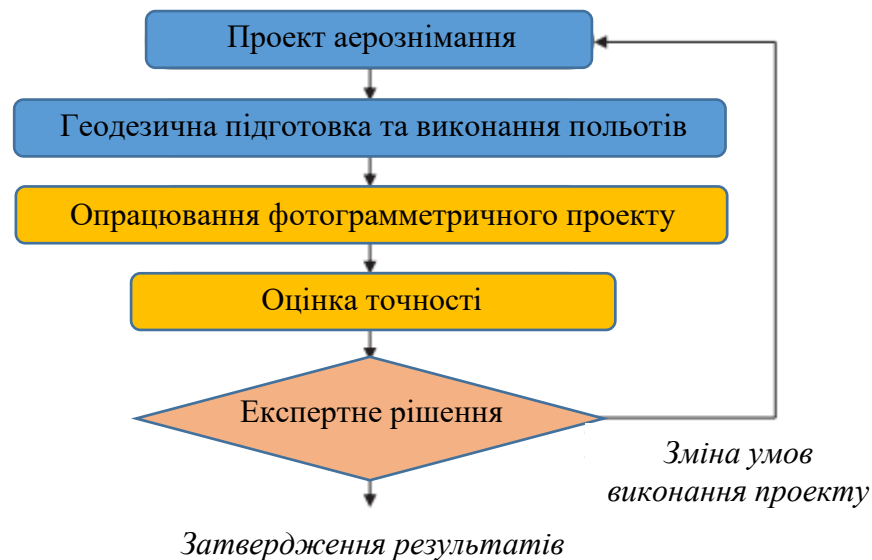


Рис.1.1. Загальна схема фотограмметричної технології

Тенденцією розвитку аерогеодезії безперечно є широке застосування компактних безпілотних літальних платформ - літаків з фіксованим крилом або вертолітного типу масою до 30 кг, на дальності не більше 10 км і на висоті нижче 300 м. Саме такі параметри відповідають обмеженням законодавства більшості країн на вільне використання літальних апаратів. Такі БПЛА оснащуються оптичною камерою малого або середнього формату (3-канальних, діючих у видимому спектрі світла або багатоспектральних), рідше – лідарами. Вони дистанційно керуються людиною або автоматично керовані автопілотом на

основі інтеграції двох основних навігаційних технологій - глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) (таких як, наприклад, GPS) та інерціальних навігаційних систем (INS) [14].

## **1.2. Фотограмметрична технологія на основі аерознімання об'єктів будівництва з безпілотних літальних апаратів.**

Процес планування зйомки – це в першу чергу проектування параметрів аерознімання, що може подаватись як послідовність таких дій:

1. Розрахунок максимальної допустимої висоти фотографування:

$$H_{max} = \frac{p\delta h}{\delta(\Delta p)}, \quad (1.1)$$

де  $H_{max}$  - висота фотографування,  $p$  - середнє значення повздовжних паралаксів точок стереопари,  $\delta h$  - допустима помилка визначення висот,  $\delta(\Delta p)$  - помилка визначення різниць повздовжних паралаксів.

2. Розрахунок знаменника масштабу знімання:

$$m \leq \frac{\delta_{пл}}{\delta_{сн}} M \quad (1.2)$$

де  $\delta_{пл}$  - допустима помилка положення точки на плані,  $\delta_{сн}$  - помилка вимірювання точки на знімку,  $M$  — знаменник масштабу плану,  $m$  — знаменник масштабу знімка.

2. Скоригувати обчислені параметри знімання з врахуванням вимог до підсумкової точності, необхідної для вирішення конкретної задачі в сфері будівництва.

3. Розрахунок фокусної відстані аерофотокамери за формулою:

$$f = H/m, \quad (1.3)$$

де  $f$  — фокусна відстань аерокамери.

При аерозніманні з безпілотних апаратів часто виникають великі значення кутів нахилу знімків. При вітряній погоді і відсутності гіростабілізуючого фотокамеру пристрою кути нахилу можуть сягати  $20^\circ$  і це негативно проявляється при дотриманні запроєктованих зон потрібного перекриття зображень.

Форма, розміри й інші особливості геометрії об'єкта який знімається для задачі його подальшої 3D реконструкції також може бути частиною планування місії дрона. Наприклад, у роботі [20] було описано метод моделювання геометрії фотограмметричного обстеження. Проте важливим є просторове розрізнення отримуваних аерознімків, або параметр «наземна відстань вибірки (GSD)». Відстань вибірки на землі (GSD) — це відстань між двома послідовними центрами пікселів знімка, виміряна на землі.

Важливо визначитися зі значенням GSD перед початком отримання зображення, щоб налаштувати висоту польоту та характеристики камери відповідно до вимог проекту. Наприклад, коли потрібна детальна реконструкція місцевості, рекомендується летіти ближче (низький GSD) до об'єкта, що цікавить. З іншого боку, при охопленні великих територій, які не потребують дуже детальних результатів, політ вище (висока GSD) може значно скоротити час збору даних і необхідні батареї, а також зменшити час обробки. Наприклад:

- GSD 5 см означає, що один піксель на зображенні лінійно відповідає 5 см на землі ( $5*5 = 25$  квадратних сантиметрів);
- GSD 30 см означає, що один піксель на зображенні лінійно відповідає 30 см на землі ( $30*30 = 900$  квадратних сантиметрів).

GSD розраховується на основі таких даних (рис.1.2) [7]:

- Висота польоту / відстань від середнього рівня висоти місцевості або об'єкта (H) до БПЛА.
- Характеристики камери: Ширина зображення (ImW); Ширина датчика (SW); Фокусна відстань (F).

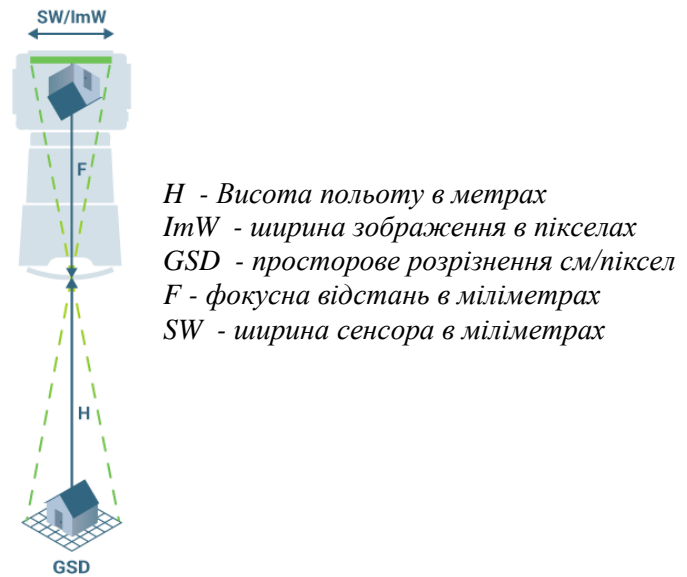


Рис.1.2. Схема розрахунку просторового розрізнення аерознімка (джерело: сайт <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809>)

Розрахунок правильної висоти польоту передбачає співвідношення між шириною датчика, фокусною відстанню та шириною зображення. Щоб розрахувати висоту польоту:

$$H [m] = (ImW * GSD * F) / (SW * 100) \quad (1.4)$$

Проте навіть під час польоту на постійній висоті зображення проекту можуть не мати однакою GSD. Це пов'язано з перепадами рельєфу місцевості та змінами ракурсу камери під час зйомки.

Деталізовано етап проектування, геодезичної підготовки та виконання польоту покажемо на основі схеми 1.3, приведеної в роботі [11].

В результаті аерознімання отримують «сирий» цифровий знімок (знімки) – це один або декілька файлів зображення місцевості, які містять отримані з цифрової фотокамери необроблені дані.

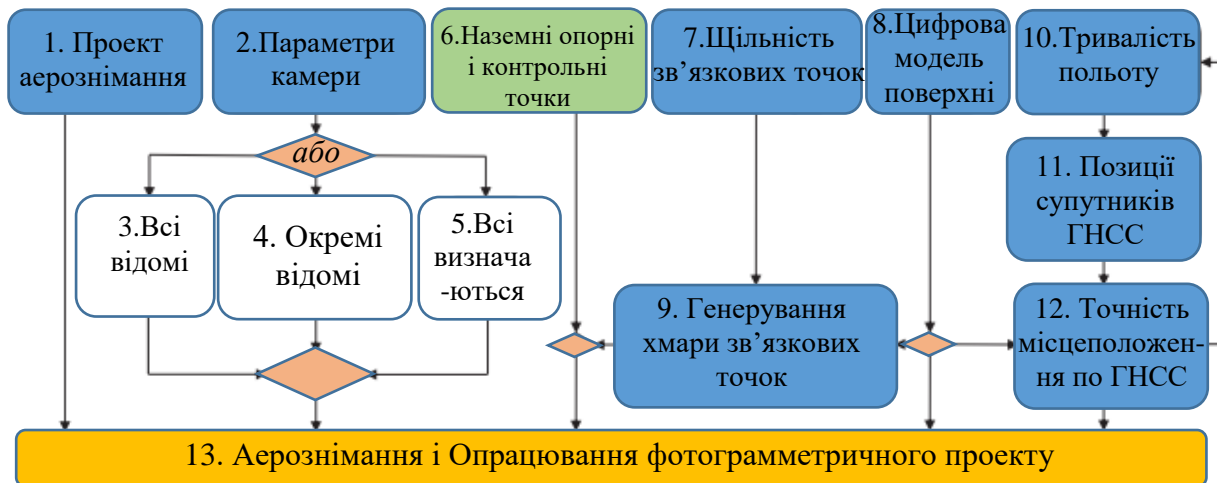


Рис.1.3. Деталізована схема проектування, геодезичної підготовки та виконання аерознімального польоту

В інженерній аерогеодезії для подальшого опрацювання такі зображення повинні бути коректно геоприв'язаними (тобто їхнє положення в геодезичному просторі має бути описане із заданою точністю і повнотою) щоб локалізувати зображені на цих зображеннях конкретні об'єкти.

Спочатку зображення орієнтуються приблизно - за допомогою навігаційних сенсорів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) та інерціальних навігаційних систем (ІНС).

Інерціальна навігаційна система – це пристрій, який жорстко зв'язаний з аерофотокамерою або авіаційним лазерним сканером. Він базується на використанні акселерометрів та гіроскопів і призначений для визначення кутів орієнтації аерофотокамери чи авіаційного лазерного сканера під час виконання аерофотознімання [16]. ІНС реєструє кути повороту, нахилу, крену літального апарата або платформи на якій закріплено знімальну систему. Кути Yaw, Pitch, Roll визначають орієнтацію дрона або камери під час отримання зображення відносно його навігаційної системи координат [25]:

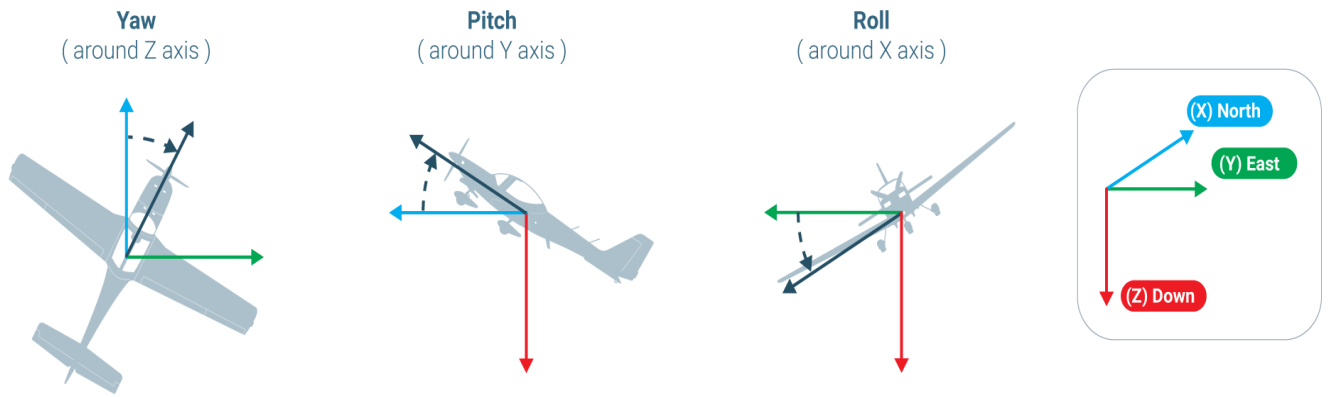


Рис.1.4. Схема визначення навігаційних кутів

Приведемо приклади значень навігаційних кутів.

- Якщо  $\text{yaw} = 0^\circ$  і камера дивиться на землю (тобто надир), це означає, що верхня частина зображення вказує на північ.
- Якщо  $\text{yaw} = 90^\circ$  і камера дивиться вниз, це означає, що верхня частина зображення спрямована на схід.
- Якщо  $\text{yaw} = 270^\circ$  і камера дивиться в нижню частину, це означає, що верхня частина зображення спрямована на захід.

В комбінаціях кутів для кожного знімка:

- $\text{yaw} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{roll} = 0^\circ$  означає: оптична вісь камери спрямована в надир (дивлячись вниз перпендикулярно до землі), верхня частина зображення спрямована на північ.
- $\text{yaw} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 90^\circ$ ,  $\text{roll} = 0^\circ$  означає, що камера дивиться вперед від літака, на північ.
- $\text{yaw} = 90^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{roll} = 0^\circ$  означає: камера знаходиться в надирі (дивлячись вниз перпендикулярно до землі), верхня частина зображення вказує на схід.

Якщо аерокамера в момент отримання нею зображення встановлена відносно осей ІНС з кутовою орієнтацією, визначеною ейлеровими кутами  $\varphi, \theta, \phi$  то перехід від напрямків трьох осей системи ІНС (назвемо цю систему координат навігаційною  $n$ ) до напрямків відповідних осей знімальної системи

(назвемо цю систему координат  $b$ ) здійснюється аналітично з допомогою трьох послідовних поворотів простору:

$$C_b^n = Rz(\psi)Ry(\theta)Rx(\varphi) \quad (1.5)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi \cdot \cos \theta & \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + \sin \psi \cdot \sin \varphi \\ \sin \psi \cdot \cos \theta & \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \cos \psi \cdot \cos \varphi & \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - \cos \psi \cdot \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cdot \sin \varphi & \cos \theta \cdot \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Обидві системи координат  $n$  та  $b$  є ортогональними. Навігаційна система координат  $n$  має початок визначений умовним центром сенсора (гіроскопа чи акселерометра) і напрямки осей:

$$\begin{aligned} x^n &= \text{напря́м на північ} \\ y^n &= \text{напря́м на схід} \\ z^n &= \text{напря́м вниз по висковій лінії} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Система координат аерокамери  $b$  має початок, визначений умовним центром проектування знімка (задня вузлова точка об'єктива цифрової фотокамери) і напрямки осей відносно осей обертання літака:

$$\begin{aligned} x^b &= \text{напря́м на передню частину літака} \\ y^b &= \text{напря́м на праву частину літака} \\ z^b &= \text{напря́м вниз} \end{aligned} \quad (1.7)$$

У випадку, якщо  $\varphi = \theta = \psi = 0$  – тоді обидві системи мають паралельні осі координат, літак головною частиною орієнтований на північ, а його праве крило – на схід.

Загальний випадок взаємного розміщення елементів навігаційних і знімальної систем показано на рис.1.



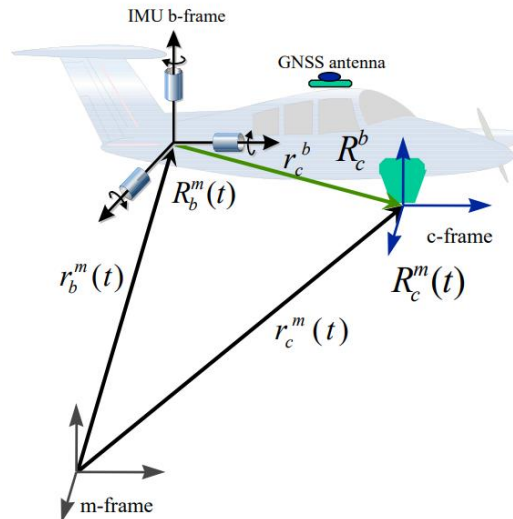


Рис.1.5. Взаємне розміщення і орієнтування складових аерознімального комплексу

Важливим в фотограмметричній технології є забезпечення проекту опорними геодезичними даними. Опорні точки забезпечують перехід від зображень, зробленими дроном, і точними вимірюваннями в реальному світі.

Традиційне геоприв'язування з використанням наземних контрольних точок (*Ground Control Point, GCP*) забезпечує надійне позиціонування, але геометрична точність критично залежить від кількості та правильності просторового розташування опорних точок. Це обмежує часову та економічну ефективність. У відповідності до діючих в Україні положень (наприклад [8]) для забезпечення інженерних вишукувань і будівництва в містах і на промислових об'єктах щільність геодезичних мереж може бути доведена до восьми пунктів на 1 км<sup>2</sup>. очевидно, при належному маркуванні цих пунктів вони можуть використовуватись як опорні точки.

Кількість і просторовий розподіл наземних точок відіграють важливу роль для досягнення заданої точності фотограмметричної моделі. Більше опорних точок необхідні для великих територій. Зазвичай в літературі рекомендується 1 GCP на кожні 60 зображень звичайних дронів і щонайменше 1 GCP на кожні 200 зображень для моделей дронів із підтримкою режимів ГНСС-вимірювань RTK/PPK. Більша кількість GCP підвищить точність, але зі зменшенням віддачі.

Опорні точки розміщують по периметру та в центрі об'єкта знімання. При наявності значних перепадів рельєфу опорні точки слід розміщувати в ключових позиціях поверхні. Кожна точка має мати добру видимість і контраст з підстильною поверхнею як для візуального розпізнавання людиною так і для правильної роботи алгоритмів машинного зору. Яскраві контрастні маркери виділяються на території, полегшуючи ідентифікацію та забезпечують точні вимірювання їхніх координат на знімках.

Кожен проект крім опорних також повинен забезпечуватись наземними контрольними точками. Основні вимоги до таких точок співпадають з вимогами до опорних точок. Помилки на різних ділянках знімання можуть змінюватися, тому важливо мати контрольні точки в кожній цікавій області. Рівномірний розподіл забезпечує надійну оцінку точності фотограмметричної моделі. Для отримання координат наземних опорних і контрольних точок використовують високоточне геодезичне обладнання як правило із забезпеченням точності перших сантиметрів.

В останні роки важливою частиною опорної геодезичної інформації для фотограмметричних проектів є центри проєкцій аерознімків, які визначаються з високою точністю інструментально в момент експозиції кожного знімка з допомогою ГНСС. БПЛА, оснащені бортовими приймачами GNSS RTK, стають фінансово доступнішими. Їхнє використання для моделювання SfM без потреби в GCP виглядає природним шляхом; однак звичайна конфігурація польоту з зніманням в надир, отриманням зображення та самокалібруванням часто дає результати зі значною систематичною похибкою висоти [21].

Кінематика в реальному часі (Real Time Kinematic, RTK) та кінематика з постобробкою (Post Processed Kinematic, PPK) дадуть відмінні результати фотограмметричного моделювання, як і застосування точних наземних опорних точок.

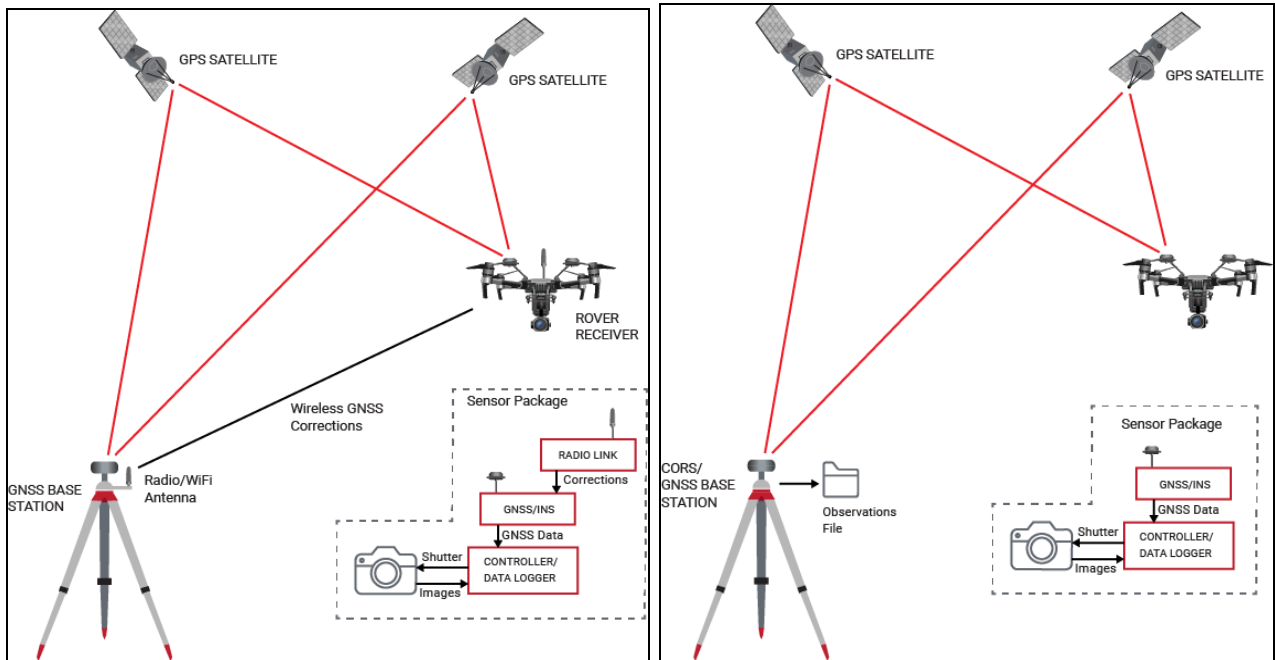


Рис.1.6. Режими роботи ГНСС для визначення точних координат центрів проекцій аерознімків.

Ліворуч: Кінематика в реальному часі (Real Time Kinematic, RTK)

Праворуч: Кінематика з постобробкою (Post Processed Kinematic, PPK)

Позиціонування RTK вимагає надійного зв'язку між базовою станцією GNSS і датчиком зображення GNSS, щоб передавати дані корекції в реальному часі на БПЛА камери. Крім того, базова станція GNSS має бути правильно налаштована та проведена зйомка для отримання найточнішого результату. Вимога щодо активного зв'язку створює оперативні проблеми для програм картографування великої відстані, особливо коли не можна підтримувати пряму видимість (LOS).

Обладнання дрона приймачем GPS з підтримкою режиму RTK обробляє дані GPS у режимі реального часу з використанням стаціонарного GPS-приймача базової станції та радіопередавача UHF/VHF у відомій контрольній точці (який передає поправку GPS) і UHF/ УКХ-приймач на дроні (що приймає поправку). RTK є дуже дорогим, він дає відмінні результати точності без необхідності додаткового аналітичного доопрацювання даних.

Натомість робота приймача в режимі РПК потребує двох приймачів GNSS. Один на землі, який називається базовою станцією, і один у БПЛА, який називається ровером без організації радіо зв'язку між ними. База є нерухомою у відомому місці. Потім, взявши файли бази та ровера в форматі rpx, слід обробляти їх за допомогою спеціального програмного забезпечення та визначаєте положення центрів проєкцій аерознімків у нашому випадку з точністю до перших сантиметрів. виправлення сигналу GPS виконуються на офісному комп'ютері після того, як зображення були зібрані і отримано дані корекції GNSS-сигналів від відповідних служб підтримки. РПК менш дорогий, він дає відмінні результати, але всі дані GPS потрібно опрацювати в офісі, щоб виправити дані про місцезнаходження GPS (режим розподіленого часу обробки).

Зрозуміло, що в загальному випадку положення центру антени GNSS та точки центру проєкції фотокамери не співпадають. Зв'язок між положенням, отриманим за допомогою GNSS, і положенням камери визначається наступним рівнянням

$$l_A + v_A = P_c^m + R_c^m \overline{a^c}, \quad (1.8)$$

де  $l_A$  – 3D положення, задане антеною GNSS,  $P_c^m$  – положення камери в кадрі відображення,  $R_c^m$  – це орієнтація камери,  $\overline{a^c}$  – відстань між центром фази GNSS-антени та центром проєкції камери.

У картографуванні за допомогою дронів коротка відстань до бази покращує надійність визначення неоднозначностей через диференціальну атмосферу, що суттєво покращує точність. Однак неправильне визначення неоднозначностей все ж може статися, якщо геометрична конфігурація слабка, а через наявність перешкод це може статися в будь-який момент польоту. З цих причин моделювання за допомогою параметрів зміщення (дрейфу) більше не є доречним, і краще спланувати виконання польоту так, щоб протягом усієї місії зберігались прийнятні умови спостережень. Як відомо, крім сили сигналу (SNR), точність GNSS позиціонування залежить головним чином від кількості

спостережуваних супутників та геометрії супутник-приймач. Ці геометричні фактори можна попередньо проаналізувати за допомогою плану місії та грубої цифрової моделі висот (DEM) на відрізку часу, що визначений користувачем (див. рис. 1.3, крок 10). Положення супутників ГНСС попередньо обчислюються з альманаху для кожного запланованого положення камери та часу (рис. 1.3, крок 11), тоді як алгоритм трасування променів дозволяє визначити, чи знаходиться цей супутник в межах лінії видимості, тобто чи не заблокований рельєфом чи високими спорудами / рослинністю поруч. Після визначення видимої конфігурації супутників прогнозується матриця коваріації позиціонування, масштабованої за точністю вимірювання відстані (рис. 1.3, крок 12). Остання залежить від передбачуваного режиму позиціонування - під час польоту (RTK) або після нього (PPK) [11].

### **1.3. Особливості фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання з БПЛА для інженерно – геодезичних вишукувань.**

В нашій роботі об'єктом дослідження в першу чергу розглядається топографічна поверхня рельєфу будівельного майданчика. Схема фотограмметричного опрацювання з метою отримання цифрової моделі такої поверхні (на рис.1.1 цей етап позначено «Processing») для знімків, отриманих з БПЛА подається на рис.1.6.

Типова технологія визначення об'ємів котлованів, кар'єрів та інших будівельних об'єктів як правило передбачає виконання повного циклу фотограмметричного опрацювання аерознімків. Для розрахунків об'ємів та площ приймається деяким чином спрощена (в першу чергу - розріджена) модель поверхні, отримана з щільної хмари 3D точок.



Рис.1.7. Схема фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання

Усі вхідні дані, а саме наближені чи точні координати центрів проєкцій зображень, координати опорних об'єктів і, можливо, положення / орієнтація камери (ГНСС + ІНС), комбінуються з відповідними вагами в рамках проєкту.

Основним співвідношенням для відновлення тривимірних об'єктів у фотограмметрії є колінеарність у рівнянні, який у своїй найпростішій формі базується на моделі камери-обскури [22]. Воно пов'язує тривимірні координати зв'язувальної точки  $P_t^m$  у кадрі відображення ( $m$ ) до його координат зображення  $(x^c, y^c)$  (виміряних від головної точки на теоретичній фокальній площині, відстань від якої до центру проєкції камери  $P_c$  дорівнює (1.9) через масштабний коефіцієнт  $\lambda$ , матрицю обертання  $R_c^m$ , і 3D положення центру перспективи камери в кадрі відображення  $P_c^m$

$$\exists \lambda \in R, \quad P_t^m = P_c^m + \lambda R_c^m \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Модель камери пов'язує координати  $(x^c, y^c)$  у рівнянні (1) до спостережуваних пікселів  $(l_x, l_y)$  у реальному зображенні. Він включає положення датчика в кадрі камери та додаткові параметри, пов'язані з відхиленням проєктуючих променів від колінеарності. Зазвичай використовуваною фізичною моделлю є модель Ферстнера та Вробеля [12], яка визначена в рівнянні (1.10).

$$\begin{bmatrix} \ell_x + v_x \\ \ell_y + v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} + p_d \cdot \left( \underbrace{(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)}_{\text{radial distortions}} \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} P_1(r^2 + 2x^c y^c) + 2P_2 x^c y^c \\ 2P_1 x^c y^c + P_2(r^2 + 2y^c x^c) \end{bmatrix}}_{\text{tangential distortions}} \right) \quad (1.10)$$

де  $(p_x, p_y)$  – положення головної точки,  $p_d$  – фокусна відстань,  $(K_{1,2,3})$  і  $(P_{1,2})$  – параметри радіальної і тангенціальної дисторсії,  $r^2 = x^c^2 + y^c^2$ .

Значення параметрів камери можна отримати з попередньо виконаних лабораторних досліджень.

Програмне забезпечення реалізує аеротріангуляцію в двох основних варіантах, залежності від складу вхідної опорної геодезичної інформації (рис.1.7):

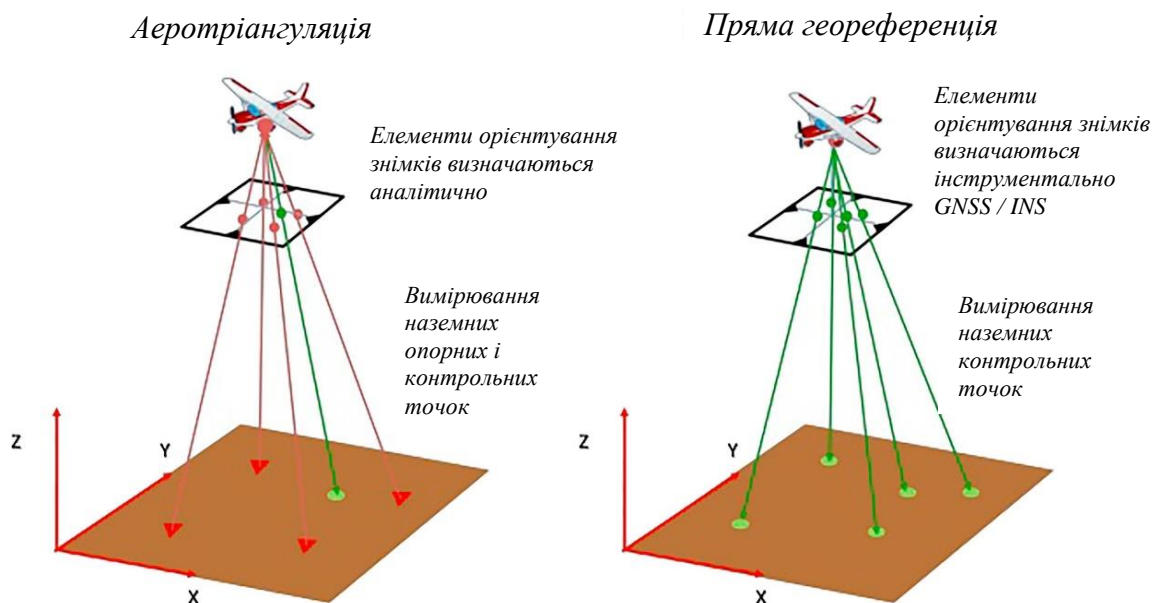


Рис.1.8. Варіанти аеротріангуляції в залежності від складу вхідної опорної геодезичної інформації [18]

Більшість виробників безпілотних літальних апаратів пишуть значення кутів повороту, нахилу та крену (Yaw, Pitch, Roll) безпосередньо в тегах EXIF

зображень або використати текстовий файл. Якщо теги EXIF доступні, значення буде автоматично перетворено на Omega, Phi і Карра під час імпорту зображень у фотограмметричний проект. Оскільки визначення повороту, тангажу та крену можуть відрізнятися для різних виробників БПЛА, неможливо гарантувати, що Omega, Phi та Карра можна точно розрахувати для всіх БПЛА.

Результатом процедури аеротріангуляції є визначення або уточнення елементів зовнішнього орієнтування знімків. Кутовими елементами орієнтування є кути омега, фі, каппа ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ). Ці кути використовуються для повороту (X, Y, Z) геодезичної системи координат і вирівнювання її із системою координат зображення [24]. Обертання застосовуються в такому порядку:

- Каппа ( $\kappa$ ), обертання навколо осі Z;
- Phi ( $\phi$ ), обертання навколо осі Y;
- Омега ( $\omega$ ), обертання навколо осі X.

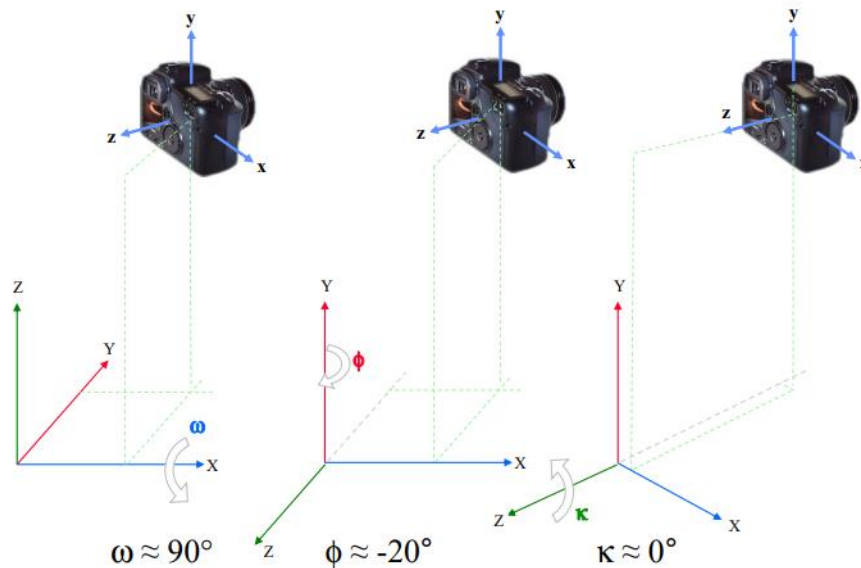


Рис.1.9. Повороти на кути зовнішнього орієнтування

При застосуванні високоточних інерціальних навігаційних систем ІНС можливо відразу перетворити навігаційні кути Yaw ( $\psi$ ), Pitch ( $\theta$ ) і Roll ( $\phi$ ) на кути Omega, Phi і Карра способами, які зокрема описані у документах [16,25]. Ця дія відбувається шляхом повороту простору  $C_B^E$ :



Враховуючи систему координат об'єкта та її зв'язок із геоцентричною системою координат (Earth-centered coordinate system, *ECEF*), а також матрицю  $C_B^b$ , що пов'язує координати зображення та систему носія, дані системи YPR (Yaw ( $\psi$ ), Pitch ( $\theta$ ) і Roll ( $\phi$ )) можна конвертувати в систему ОРК (омега, фі, капша ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ )) окремо для кожної камери в позиції  $p$  (тобто з навігаційною системою  $n(p)$ ) наступним чином:

1. Кути YPR в точці  $p \rightarrow$  матриця повороту YPR  $C_b^{n(p)}$ .
2. Матриця обертання YPR  $C_b^{n(p)} \rightarrow$  ОРК матриця обертання  $C_B^E$
3. Матриця повороту ОРК  $C_B^E \rightarrow$  ОРК кути.

Матриця  $C_b^{n(p)}$  кроку 1 описана рівняннями (1.5). Матрицю  $C_B^E$  на кроці 2 можна обчислити за допомогою

$$C_B^E = C_{n(p)}^E \cdot C_b^{n(p)} \cdot C_B^b \quad (1.11)$$

Потім необхідно обчислити  $C_{n(p)}^E$ . Нехай ( $lat$ ,  $long$ ) — географічні координати в точці  $p$  і  $\delta > 0$  достатньо мале. Використовуючи функцію  $pos : Lat \times Long \times Alt \rightarrow E$ , яка пов'язує систему координат об'єкта та систему ECEF, ми можемо обчислити

$$x^{n(p)} = \frac{p_1 - p_2}{\|p_1 - p_2\|}, \quad p_1 = pos(lat + \delta, long, alt), \quad p_2 = pos(lat - \delta, long, alt) \quad (1.12)$$

Враховуючи результати розрахунків на кроці 1 та 2 а також визначимо

$$z^{n(p)} = (0, 0, -1)^T \quad \text{та} \quad y^{n(p)} = z^{n(p)} \times x^{n(p)},$$

отримаємо рівняння трансформації:  $C_{n(p)}^E = \langle x^{n(p)} | y^{n(p)} | z^{n(p)} \rangle$ .

Після обчислень матриці обертання  $C_B^E = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$ , кути ОРК можуть

бути обчислені за формулами:

$$\omega = \arctan2\left(\frac{-c_{23}}{c_{33}}\right), \quad \phi = \arcsin(c_{13}), \quad \kappa = \arctan2\left(\frac{-c_{12}}{c_{11}}\right). \quad (1.13)$$

У програмному забезпеченні Pix4D припускається за замовчуванням, що камеру встановлено таким чином, що верх зображення  $y^B$  вказує в напрямку польоту  $x^b$ , а камера дивиться вниз, тобто  $-z_B$  та  $z_b$  мають однаковий напрямок. Це означає, що ми використовуємо матрицю повороту

$$C_B^b = C_b^B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

для опису зв'язку між зображенням і системою координат літака.

Процес фотограмметричного опрацювання далі продовжується автоматичним збором зв'язкових точок (tie-points). Як правило, всі програмні продукти, які реалізують фотограмметричне опрацювання знімків, отриманих з БПЛА, передбачають вимірювання надмірно великої кількості зв'язкових точок (декілька сотень точок на кожен стереопару), рівномірно розподілених по площі взаємного перекриття знімків.

При цьому застосовують доволі затратні (у вимірі машинного часу) алгоритми глобального або напівглобального попиксельного ототожнення відповідних точок цифрових стереопар аерознімків. Зауважимо, що знімання такого роду об'єктів з малих висот створює хороші передумови для отримання високої щільності (з огляду на вирішувану задачу – часто явно надмірної) хмари точок та для створення надійної мережі точок аеротріангуляції [19].

Аеротріангуляція, при якій знімки пов'язуються один з одним в фотограмметричний блок через спостереження за так званими «опорними точками» (tie-points), є найбільш поширеним методом. Далі складені із зв'язкових точок 3D-моделі в об'єктному просторі орієнтуються в просторі за допомогою заданої кількості наземних опорних точок (GCPs) або відомих з ГНСС спостережень координат центрів проєкцій знімків. Ці точки обмежують спотворення моделі через накопичення помилок і також використовуються для контролю якості створюваних 3D моделей.

Використовуючи системи координат, визначені вище, для кожної точки, що спостерігається на зображенні (P), зв'язок між камерою та наземною системою координат (Ob) можна описати наступним рівнянням:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ob} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{ob} + \lambda R_P^{Ob}(\omega, \varphi, \kappa) \begin{pmatrix} (x' - x_p) \\ (y' - y_p) \\ -f \end{pmatrix}_P \quad (1.14)$$

Параметрами внутрішнього орієнтування є головна точка знімка ( $x_p, y_p$ ) і фокусна відстань  $f$ , а параметрами зовнішнього орієнтування є координати центру проєкції в системі координат об'єкта і матриця обертання  $R_P^{Ob}(\omega, \varphi, \kappa)$ - це матриця повороту від координати зображення до системи координат об'єкта.  $\lambda$  є коефіцієнтом масштабу.

Враховуючи положення камери, пристроїв GPS та INS змонтованих у корпусі БПЛА, які описуються відповідними лінійними і кутовими елементами один відносно одного і відносно глобальної геоцентричної системи координат, рівняння 1.14 можна розширити до рівняння:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ob} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{ob} + R_{INS}^{Ob} \left( \lambda R_P^{INS} \begin{pmatrix} (y' - y_p) \\ (y' - y_p) \\ -f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_{cam} \\ \Delta Y_{cam} \\ \Delta Z_{cam} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix} \right)_P \quad (1.15)$$

тут:

$$P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ob}$$

Точка об'єкта в системі координат об'єкта (глобальній геоцентричній або в локальній системі координат) Ob.

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{ob}$$

Визначене GPS положення камери в системі координат об'єкта Об.

$$\begin{pmatrix} \Delta X_{cam} \\ \Delta Y_{cam} \\ \Delta Z_{cam} \end{pmatrix}$$

Вектор між INS і центром проєкції камери, визначений у системі координат INS.

$$\begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix}$$

Вектор між GPS (фазовим центром антени) та INS, визначений у системі координат INS.

$R_{INS}^{Ob}$	Поворот системи координат ІНС до системи координат об'єкта Об. Кути повороту визначаються інструментально під час експозиції знімка через модуль INS.
$R_P^{INS}$	Поворот системи координат зображення Р в систему координат INS.

Зазначимо, що такий підхід до визначення елементів зовнішнього орієнтування аерознімків та координат точок зображеного на знімку об'єкта доцільно використовувати у випадках, коли положення центрів проєкцій інструментально визначаються з середньою квадратичною помилкою  $RMSE_{x_0, y_0, z_0} = \pm 0.03\text{м}$ . Таку точність в звичайних умовах функціонування ГНСС забезпечують сучасні пристрої – наприклад інтегрований міні GPS / INS компанії Inertial Labs [10]:

середні помилки виміру координат в РРК режимі

$$RMS_{X_0} = RMS_{Y_0} = RMS_{Z_0} = \pm 0.005\text{м} ;$$

середні помилки виміру навігаційних кутів Pitch ( $\theta$ ) і Roll ( $\varphi$ )

$$RMS_{\text{Pitch}(\theta)} = RMS_{\text{Roll}(\varphi)} = \pm 0.006^\circ ;$$

середня помилка виміру навігаційного кута Yaw ( $\psi$ )

$$RMS_{\text{Yaw}(\psi)} = \pm 0.03^\circ .$$

Наступний етап фотограмметричного опрацювання, який має високий рівень автоматизації – це побудова хмари 3D точок високої щільності (з щільністю аж до точки на піксель) і вже на її основі - DSM (цифрових моделей поверхні), DTM (цифрових моделей рельєфу, ЦМР) та ортофотомозаїк. Цифрові моделі поверхні (ЦМП) та ортофотоплани є двома основними картографічними продуктами опрацювання аерознімків з БПЛА. Типове фотограмметричне програмне забезпечення для опрацювання даних знімків з дронів використовує

алгоритм SfM (Structure from Motion) для створення 3D хмар точок, DSM (цифрових моделей поверхні) та ортофотомозаїк досліджуваної території.

Процес ініціалізації густої та рівномірної хмари 3D точок є часозатратним. Крім того, цей процес інколи ускладнюється рельєфом місцевості, що значно обмежує час реакції та застосування БПЛА в складних умовах і/або за суворими вимогами точності [11,13]. Також суттєвим на якість створення хмар точок є вплив текстури зображення, адже оптична щільність прив'язної точки на поверхнях з однорідною текстурою (наприклад, вода, свіжий сніг і певні типи рослинності) може бути низькою або навіть дорівнювати нулю, тоді як вона може бути надзвичайно високою в середовищах з багатою текстурою (таких як забудова області). Методи комп'ютерного бачення для автоматичного генерування 3D точок вертикальну точність між  $\mu_h=2.5\text{GSD}$  і  $\mu_h=4\text{GSD}$ . На хмару точок, DSM і, як наслідок, точність ортомозаїки також впливає якість вихідних зображень та їх візуальний вміст. Гострі краї ярів, дерева, поверхні, що сильно засвічують знімок, а також певні типи доріг і дахів можуть бути менш точними.

## **2. Аналіз методики визначення об'ємів земляних робіт за даними аерознімання.**

### **2.1. Загальні принципи оцінки точності фотограмметричного моделювання.**

Визначальними у визначенні точності фотограмметричних побудов є визначення відносної та абсолютної точності. Також важливо визначити вплив використання наземних опорних і контрольних точок або оснащення безпілотників RTK/PPK апаратурою підвищує абсолютну точність результатів моделювання.

Точність виходів можна розділити на:

- **Відносна точність** фотограмметричного проекту визначається шляхом порівняння окремих об'єктів на карті/реконструйованій моделі чи на ортомозаїці з іншими об'єктами на тій же моделі. Наприклад, відносна точність моделі є високою, якщо дві точки мають однакову відстань між собою на моделі та в дійсності.
- **Абсолютна точність** фотограмметричного проекту визначається різницею між розташуванням об'єктів на карті/реконструйованій моделі/ортомозаїці та їх справжнім положенням у певній системі відліку. Наприклад, якщо положення дороги в реконструйованій моделі близьке до її фактичного положення на Землі, то абсолютна точність є високою. Додавання точно виміряних опорних точок або використання безпілотників RTK/PPK може значно підвищити абсолютну точність.

Відносна точність буде залежати від якості підготовки і виконання проекту, яка сама по собі залежить від точності геоприв'язування знімків, візуального вмісту зображень та багатьох інших параметрів. Як правило, можна очікувати помилку в 1-3 рази більшу, ніж розрізнення знімка на землі (GSD) оригінальних зображень для відносного положення точки в проекті, який правильно масштабовано та реконструйовано. Разом з тим відносна помилка не є однаковою для всієї моделі – деякі точки будуть більш точними, ніж інші,

залежно від кількості зображень, на яких вони видимі (накладаються), наскільки вони близькі до центру знімка або до опорної точки, просторового розрізнення у цій області тощо.

Із збільшенням просторового розрізнення (зменшення величини параметра GSD менше одного сантиметра важче отримати ідеальні умови, адже зростають перспективні спотворення зображення, у більшій мірі проявляються вібрація камери, розмиття, падіння глибини різкості тощо.

Позитивний вплив на покращення відносної точності можуть справити ручне додавання зв'язкових точок в малоконтрастних, малотекстурних ділянках зображень, вводити додаткові геометричні умови створення блоку, такі як масштабні обмеження тощо [15].

Абсолютна точність фотограмметричної моделі значною мірою залежить від точності геодезичного забезпечення знімання – точності визначення просторових координат центрів проекції з допомогою GNSS-приймача дрона та від якості мережі наземних опорних точок (їхня кількість, геометрія розміщення і точність визначення просторових координат, точність розпізнавання на аерознімках). Дрони зі стандартним навігаційним GNSS-приймачем забезпечують геолокацію зображення з очікуваною точністю в кілька метрів тому в таких проектах обов'язково повинні проектуватись і використовуватись наземні опорні точки.

Загалом, очікувана відносна точність правильно реконструйованого проекту з точною геоприв'язкою становить:

- 1-2 x GSD по горизонталі (координати X, Y).
- 1-3 x GSD по вертикалі (координата Z).

Розглянемо приклад проекту, який виконується за допомогою безпілотної з використанням стандартного навігаційного GNSS-приймача (діапазон точності в кілька метрів), із GSD 5 см, очікується:

- Відносна точність по горизонталі становить 5-10 см, а по вертикалі - 5-15 см.
- Абсолютна горизонтальна і вертикальна точність знаходиться в діапазоні точності приймача GNSS (кілька метрів точності)

Для проекту, який виконується за допомогою дрона зі стандартним GNSS-приймачем, із GSD 5 см і опорними точками, очікувані:

- Відносна точність по горизонталі становить 5-10 см, а по вертикалі - 5-15 см.
- Абсолютна горизонтальна і вертикальна точність знаходиться в діапазоні похибок опорних точок, але вона не може бути вище відносної точності проекту.

Для проекту, який виконується за допомогою безпілота RTK/PPK, із GSD 5 см очікується:

- Відносна точність по горизонталі становить 5-10 см, а по вертикалі - 5-15 см.
- Абсолютна горизонтальна і вертикальна точність знаходиться в діапазоні точності безпілота RTK/PPK, але не може бути вище відносної точності проекту.

Збільшення кількості наземних опорних точок (GCP) покращує як відносну, так і абсолютну точність проекту. Окрім МТР, опорні точки включають виміряні координати, які використовуються для географічної прив'язки проекту. Рекомендується використовувати контрольні точки для оцінки абсолютної точності моделі. За допомогою контрольних точок можна отримати різницю між реконструйованою моделлю та відомим положенням точок.

Покращення створюваної цифрової растрової моделі рельєфу до реальної поверхні можливе зменшенням розміру комірки (дискретизація) і збільшенням точності інтерполяції висот у вузлах сітки.



Для наближення триангуляційної моделі рельєфу до реальної поверхні в неї додають додаткові геометричні об'єкти, такі як точкові, лінійні і площинні структурні елементи. Такими додатковими елементами є широко застосовувані в топографії екстремальні точки рельєфу, структурні лінії: водорозділи, тальвеги, хребти, обриви, уступи, озера, яри, берегові лінії, границі штучних споруд. Ці структурні елементи вбудовуються в триангуляцію Делоне (TIN) як нові вузли і як «жорсткі» ребра трикутників. Така задача називається триангуляцією Делоне з обмеженнями.

## 2.2. Математичні моделі визначення об'ємів земляних робіт.

Об'єми запасів можна визначити різними методами. Традиційним підходом є зйомка характерних ліній зламу або планіметрія, де об'єм обчислюється шляхом інтерполяції та підсумовування поперечних перерізів/профілів уздовж осі.

Для форм, які зображені на топографічних планах і картах, об'єм  $V$  можна визначити як суму об'ємів окремих горизонтальних шарів  $v_i$ , [1,7].

$$v_i = (p_i + p_{i+1})z_i / 2, \quad (2.1)$$

де  $p_i$  і  $p_{i+1}$  – площі горизонтальних площин які обмежують шар зверху і знизу;  $z_i$  – перевищення між сусідніми горизонтальними площинами (як правило обмеженими горизонталями). Об'єм вершини чи низини форми рельєфу обчислюють як об'єм конусу з висотою  $Dz$  і площею  $p_n$ :

$$V = 1/3(p_n Dz). \quad (2.2)$$

Повний об'єм є сумою і становитиме

$$V = (z/2)(p_1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p_i + p_n) + (p_n Dz)/3. \quad (2.3)$$

Існує наближений спосіб розрахунку об'єму

$$V = PH. \quad (2.4)$$

де  $P$  – площа основи об’єкта;  $H$  – середня висота об’єкта, яка обчислюється за середніми висотами  $h_i$  окремих елементарних площ (квадратів, прямокутників, шестикутників) за формулою  $H=(h_1 + h_2 + \dots + h_n)/n$ .

Однак із сучасними простими та швидкими у використанні GNSS-приймачами, наземними лазерними сканерами та аерофотограмметрією БПЛА очевидною є тенденція покривати поверхню об’єктів щільною точковою мережею замість простих поперечних перерізів або кількох структурних ліній. Програмні інструменти в стандартному програмному забезпеченні ГІС і САПР дозволяють дуже точно обчислювати об’єм шляхом віднімання досліджуваної поверхні з колишньої існуючої поверхні або віртуальної базової площини. Також часто застосовують об’ємні коефіцієнти для конкретних матеріалів (наприклад типу ґрунту), для визначення розпушеності і обчислення норм транспортних затрат.

Комп’ютерні програми, такі як PIX4Dmapper розраховують об’єм таким чином:

- користувач окреслює замкнутою полілінією основу об’єкта вручну, PIX4Dmapper створює базу поверхню (основу об’єкта) з урахуванням висоти кожної вершини полілінії;
- PIX4Dmapper проектує просторову регулярну сітку із заданим інтервалом або з інтервалом GSD. Для вузлів сітки інтерполюються значення відміток за допомогою 3D точок видимої поверхні DSM (рис.2.1);
- Для кожної комірки сітки формується паралелепіпед з об’єм ( $V_i$ ) визначається як:

$$V_i = L_i \cdot W_i \cdot H_i \quad (2.5)$$

де:  $L_i$  = довжина комірки;  $W_i$  = ширина комірки;  $H_i$  = висота комірки, яка визначається як:  $H_i = Z_{Ti} - Z_{Bi}$

де:  $Z_{Ti}$  = відмітка висоти рельєфу кожної комірки в центрі комірки з номером  $i$ ;  $Z_{Bi}$  = відмітка висоти комірки з номером  $i$  в центрі її основи.

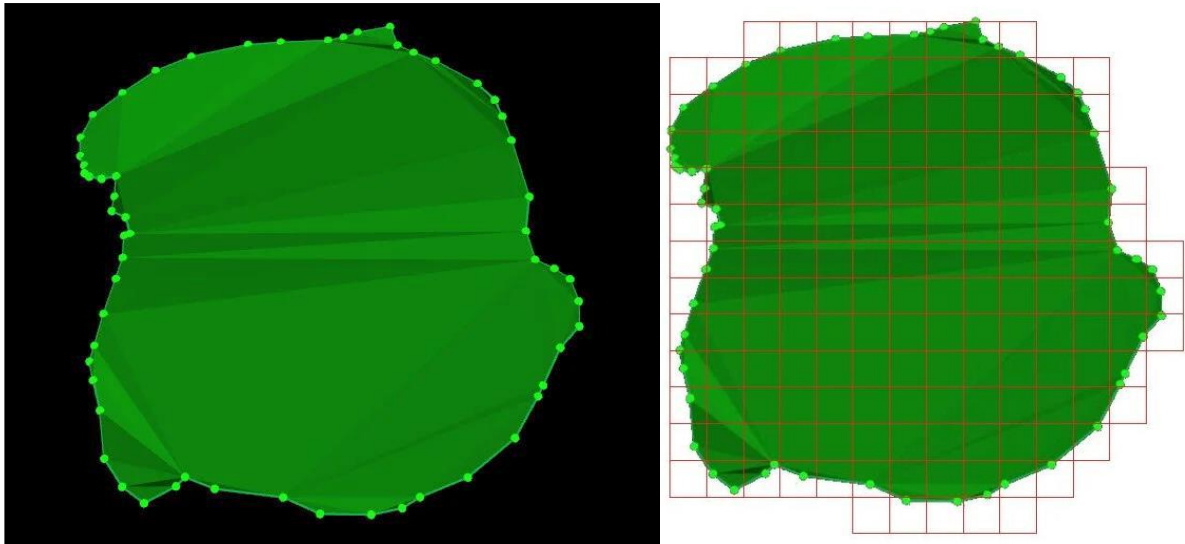


Рис.2.1. Формування поверхні основи та розбиття регулярної сітки по поверхні 3D об'єкта (насипу чи виїмки)

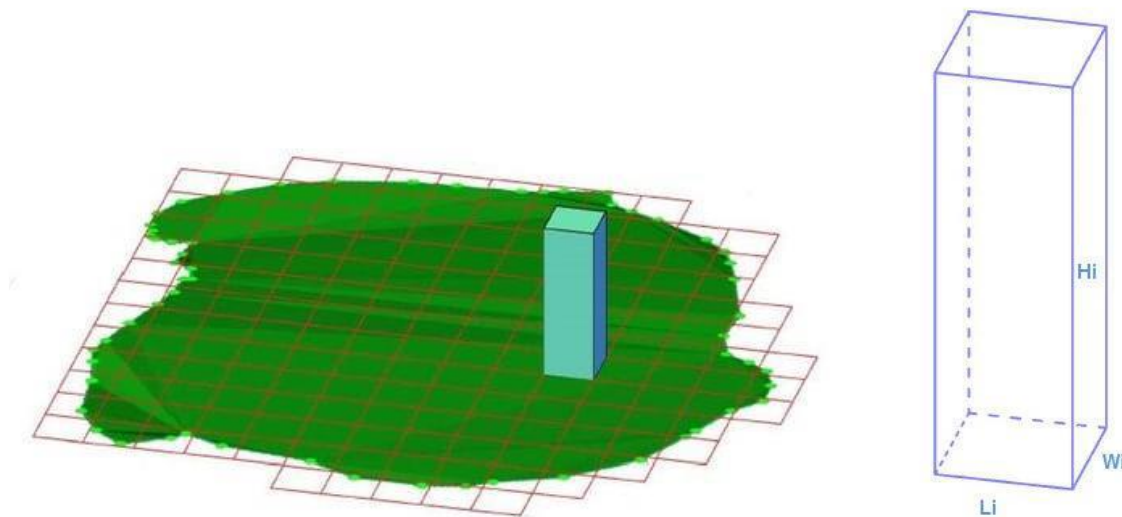


Рис.2.2. Формування елементарного паралелепіпеда для обчислення об'єму 3D об'єкта (насипу чи виїмки) [7]

Можливий режим обчислень з одночасним розрахунком об'ємів насипів та виїмок:

- об'єм насипу  $V_c$  — це об'єм між основою та 3D-рельєфом, коли рельєф вищий за основу,  $V_c = V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{cN}$ , де  $V_{c1..N}$  — об'єми комірок з додатніми перевищеннями  $i..N$ ;

- об'єм виїмки (заповнення)  $V_F$  – це об'єм між основою та рельєфом, коли рельєф нижчий за основу,  $V_F = V_{F1} + V_{F2} + \dots + V_{FM}$ , де  $V_{F1\dots M}$  - об'єми заповнення комірок  $i\dots M$ .

Загальний об'єм  $V_T$  визначається як сума:

$$V_T = V_C + V_F \quad (2.6)$$

Щоб обчислити помилку визначення об'єму, спочатку потрібно обчислити помилку об'єму для кожного паралелепіпеду. При дотриманні технології геодезичної підготовки місцевості і фотограмметричного опрацювання висоти  $Z$  3D-точки обчислюються з точністю від 1 до 3-кратної відстані параметра GSD. Середня помилка висоти кожної 3D-точки в 1,5 рази перевищує GSD. Якщо кожна комірка основи об'єкта має ширину та довжину, що дорівнює GSD, похибка в напрямках  $X$  та  $Y$  оцінюється як 0.

Помилка для однієї комірки обсягу визначається як:

*помилка в напрямку  $X$  (довжина) = 0 см.*

*помилка в напрямку  $Y$  (ширина) = 0 см.*

*помилка в напрямку  $Z$  (висота) = 1,5 \* GSD.*

Помилка визначення об'єму для кожної комірки  $E_i$  визначається як:

$$E_i = L_i \cdot W_i \cdot Z_{ei} = GSD \cdot GSD \cdot 1,5 \cdot GSD = 1,5 \cdot GSD^3 \quad (2.7)$$

де:

$L_i$  = довжина комірки;  $W_i$  = ширина комірки;  $Z_{ei}$  = помилка визначення координати  $Z$  комірки.

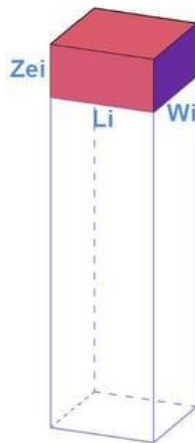


Рис.2.3. Помилка об'єму елементарного паралелепіпеду [7]

Після обчислення помилки визначення елементарного об'єму для кожної комірки обчислюється помилка виїмки, насипу та загального об'єму шляхом підсумовування помилок для кожної комірки.

- Помилка об'єму насипу:  $E_{C1} + E_{C2} + \dots + E_{CN}$
- Помилка об'єму виїмки:  $E_{F1} + E_{F2} + \dots + E_{FM}$
- Помилка загального об'єму = помилка об'єму насипу + помилка об'єму виїмки.

Як слідує з вище наведеного, величина похибки в обчисленнях об'єму насипів і виїмок прямо залежить від просторової роздільної здатності знімків (параметр GSD). Очевидно, він визначає точність, з якою були обчислені просторові координати кожної точки. По-друге, високе значення GSD також може спотворювати результат розрахунку об'ємів. Наприклад у проекті, де GSD = 50 см, обчислення об'єму об'єкта висотою 50 см матиме дуже велику похибку: помилка обсягу для цієї комірки  $E_i = L_i \cdot W_i \cdot Z_{ei} = 187\,500 \text{ см}^3$ . Тому в цій задачі важливим є вибір відповідного GSD залежно від висоти об'єму, який потрібно розрахувати. Для коротких об'єктів рекомендується мале значення GSD (висока просторова роздільна здатність).

Нижчу точність об'єму слід очікувати для об'єктів, де обчислено мало 3D-точок. Оцінка помилки PIX4Dmapper не враховує це. Якщо похибка об'єму є вищою або меншою за  $1,5 \cdot \text{GSD}$ , то формулу для розрахунку похибки об'єму кожної комірки потрібно скоригувати.

Приклад: для проекту з GSD = 5 см PIX4Dmapper оцінює помилку обсягу  $E_i = 1,5 \cdot \text{GSD}^3 = 187,5 \text{ см}^3$ . Однак, якщо вважати, що  $Z_{ei}$  (похибка в напрямку Z комірки) становить 10 см, то похибка об'єму кожної комірки дорівнює:

$$E_i = L_i \cdot W_i \cdot Z_{ei} = \text{GSD} \cdot \text{GSD} \cdot 10 \text{ см} = 250 \text{ см}^3 .$$

Точність визначення об'єму зазвичай виражається у відсотках похибки і залежить не тільки від точності опису геометрії поверхні об'єкта, але також від

висоти/товщини запасу. Діаграма нижче ілюструє цей принцип. Як видно з цього прикладу, точність об'єму 10-метрового насипу менш чутлива до поверхневих помилок, ніж 3-метрового насипу [22].

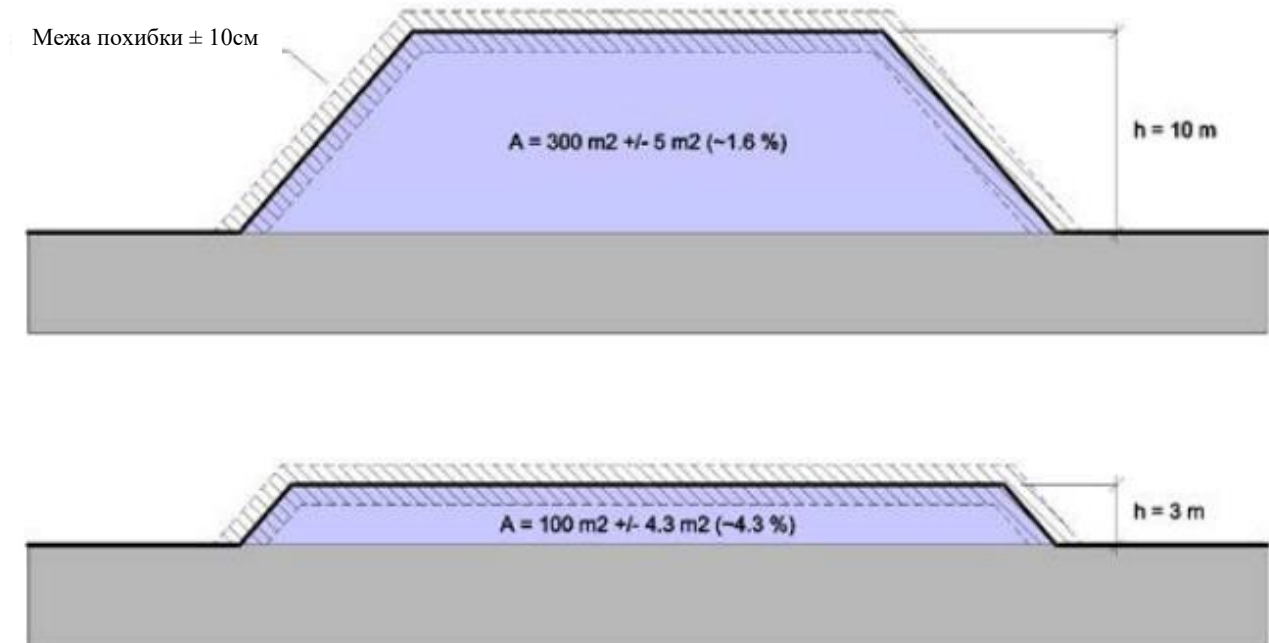


Рис.2.4. Вплив висоти об'єкта на точність визначення його об'єму із заданою помилкою опису геометрії поверхні

Грунтуючись на цьому прикладі, ми можемо зробити висновок, що за допомогою фотограмметрії БПЛА розрахунок об'єму на основі методу різниці поверхонь досягається з точністю, необхідною для виконання практичних вимог геодезиста. Результати дослідження показують, що загальна середня висота цих поверхонь лише в межах сантиметрів відхиляється від «справжньої» поверхні. Це в основному досягається завдяки високому просторовому розрізненню моделей поверхні, незважаючи на те, що висоти в одній точці фактично показують варіацію/шуму до 3-кратного GSD. Для розглянутого застосування така похибка є незначною, і, якщо потрібно, геодезисти мають можливість отримати більш точні результати, використовуючи або більш адаптовану камеру, або зменшивши висоту польоту.

У той час як традиційні методи зйомки все ще є цікавою альтернативою для невеликих поверхонь, фотограмметрія БПЛА не має собі рівних з точки зору ефективності для поверхонь понад кілька гектарів, водночас забезпечує еквівалентну точність. Крім того, використання методу зйомки БПЛА створює не лише DSM, але й високо деталізовану ортомозаїку з географічним прив'язуванням, що є важливою додатковою цінністю для документації місць складування і зберігання.

Використовуючи польоти на низькій висоті ( $<45$  м), можна виявити зміни поверхні за допомогою фотограмметричного робочого процесу з порогом нижче 5 см. Оцінки точності мають вирішальне значення для оцінки значних змін між двома поверхнями. Загалом, робочий процес PPK-SfM долає деякі основні обмеження GCP та забезпечує високоточне та високоефективне рішення для геодезичних та геоморфологічних застосувань[ 13].

### 3. Визначення об'ємів земляних робіт на будівельному майданчику в с.Малехів Львівського району за аерознімками з безпілотної літальної апарату.

#### 3.1.Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є майданчик нового будівництва виробничо-складського комплексу з приміщеннями громадського призначення на земельній ділянці кадастровий номер 4622785700:03:001:0255 на вулиці Київській в с. Малехів Львівського району Львівської області.



Рис.3.1. Об'єкт дослідження

Девелопером даного проєкту є компанія Alterra Group — українська компанія, що спеціалізується на девелопменті та управлінні комерційною нерухомістю «під ключ». У портфелі компанії 35 об'єктів загальною площею 175 000 м<sup>2</sup>. Серед них – складські та виробничі комплекси, бізнес-центри, торгові та торгово-розважальні центри. Найбільш значимим проєктом цієї компанії є логістичний центр "PORT" у м.Львів на 77000 м<sup>2</sup>.



Забудовником є юридична особа «Товариство з обмеженою відповідальністю "ХАБ ДЕВЕЛОПМЕНТ"».



загальна площа: 51 000 м<sup>2</sup>  
склад «А» та «В»: 27 604 м<sup>2</sup>  
склад «0»: 8 261 м<sup>2</sup>  
мультитемпературний склад: 6 809 м<sup>2</sup>  
рітейл-парк: 6 457 м<sup>2</sup>

Рис.3.2. Черги будівництва та вводу в експлуатацію будівель об'єкта дослідження

Топографічне знімання територію було виконане до початку будівництва в січні 2022 року. Складено топографічний план і ортофотоплан масштабу 1:500 в форматі програмного забезпечення Digital. Система координат плану СК63, система висот Балтійська. Ділянка раніше використовувалась під ріллю, вільна від багаторічної і кущової рослинності. Перепад висот на ділянці складає 5,62м – від відмітки 262,1м до 267,13м.

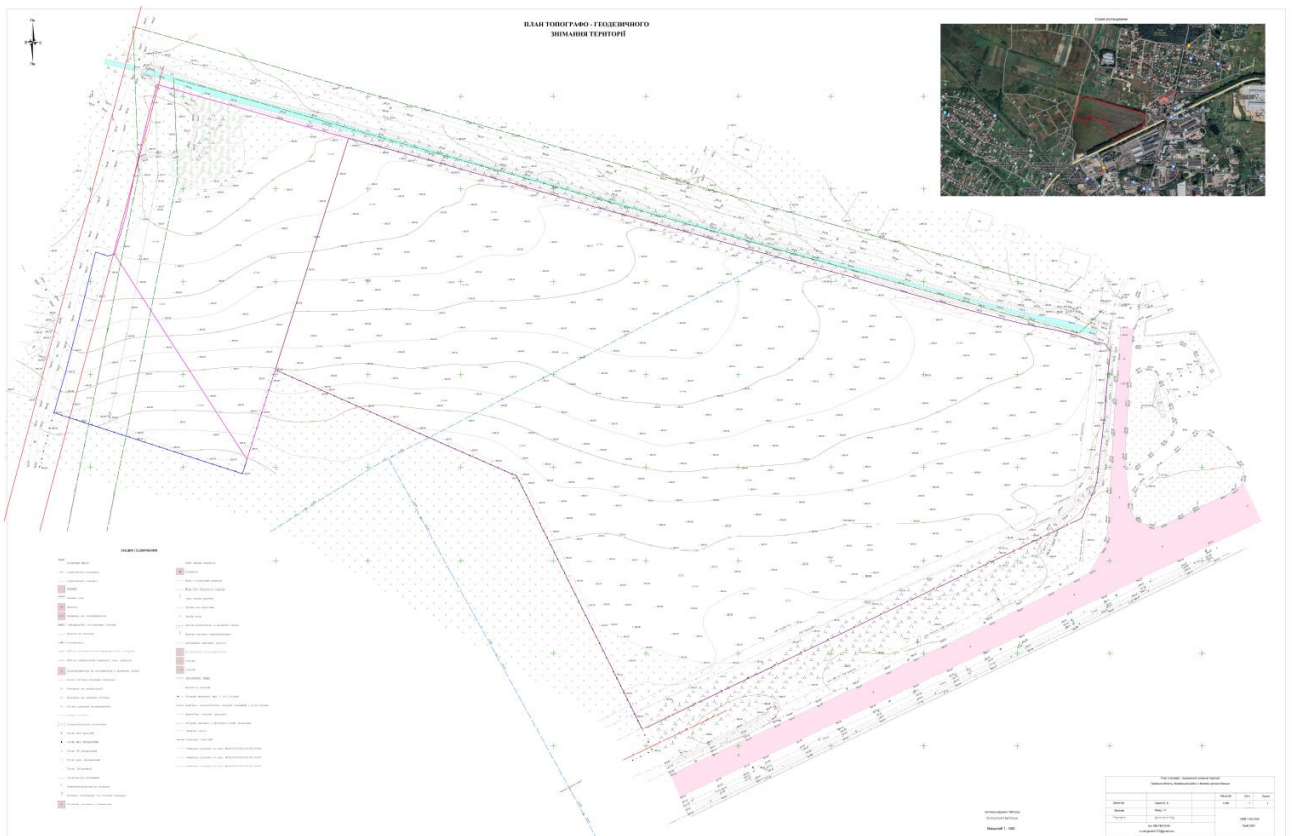
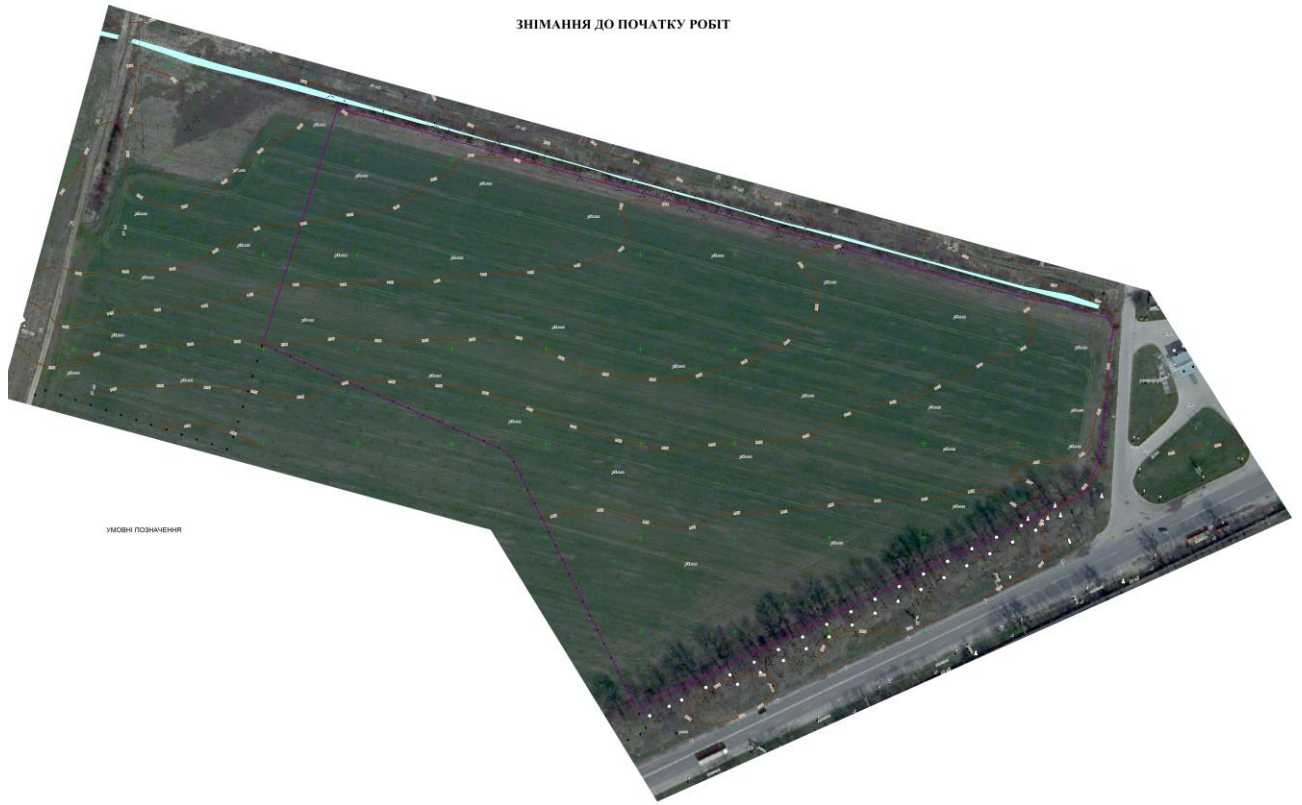


Рис.3.3. Топографічне знімання території до початку будівництва.

До топографічних матеріалів також відноситься креслення генерального плану будівництва в масштабі 1:500 і план узгодження меж, виконані ПП «Львівбудпроект» в 2023 році.

### **3.2. Вихідні дані та матеріали виконавчого аерознімання котлованів будівель 7 та 8 черги.**

Для виконавчого аерознімання будівництва нульового циклу 7 та 8 черг виробничо-складського комплексу використовувався БПЛА вертолітного типу DJI Mavic 3E Enterprise. Це професійний інженерний квадрокоптер для фото/відео знімання, підтримує високоточне позиціонування за допомогою RTK, що дозволяє виконувати високоефективні картографічні та геодезичні місії без необхідності використання наземних контрольних станцій, що скорочує витрати часу і коштів на збір геоданих. DJI Mavic 3E оснащений 20-мегапіксельною ширококутною цифровою фотокамерою з CMOS-сенсором 4/3 з відносно великого розміру пікселями 3,3 мкм. Така конструкція разом з інтелектуальним режимом корекції слабкого освітлення забезпечують значно покращену продуктивність і можливість використовувати дрон протягом більшого часу доби порівняно із звичайними моделями. Потужна камера з гібридним зумом (56-кратним збільшенням) має еквівалентну фокусну відстань 162 мм для зображень з роздільною здатністю 12 МП. Дрон портативний та зручний в застосуванні. Його основні переваги (за даними сайту [https://copter.com.ua/products/dji-mavic-3e-enterprise-kvadrokopter/?utm\\_source=share](https://copter.com.ua/products/dji-mavic-3e-enterprise-kvadrokopter/?utm_source=share)):

- Ширококутна камера (4/3 CMOS);
- 56-х кратний гібридний зум;
- Технологія передачі сигналу DJI O3 Enterprise.

Квадрокоптер DJI Mavic 3E Enterprise має наступні технічні характеристики, приведені в таблиці 3.1.

Табл.3.1. Технічні характеристики квадрокоптера DJI Mavic 3E Enterprise

Частота сигналу Wi-Fi: 2,4 ГГц, 5,8 ГГц

Управління: пульт ДУ, смартфон/планшет

Макс. дозвіл відео: 4К (3840 x 2160)

Підтримка карток пам'яті: microSD до 256GB

Характеристики польоту:

Час польоту 45 хв

Радіус дії 32 км

Максимальна швидкість, м/с 15

Функції польоту автоповернення, атопілот, «слідувати за мною», утримання висоти, обліт перешкод, діагностика перешкод.

Характеристики електроживлення:

Тип живлення моделі Змінний акумулятор Li-Pol, 4S

Ємність акумулятора пульту 5000 мАг

Ємність акумулятора дрона 5000 мАг

Фізичні характеристики:

Розміри 221 × 96.3 × 90.3 мм

Вага 920 г

Параметри фотокамери і GNSS приймача, важливі для топографічного аерознімання, приведені в таблиці 3.2.

Табл.3.2. Характеристики аерознімального та навігаційного комплексів квадрокоптера DJI Mavic 3E Enterprise

Матриця	4/3" (CMOS)
Формати фото	JPEG, DNG
Кількість ефективних пікселів, МП	20
Швидкість електронного затвора	8 - 1/8000 с
Швидкість механічного затвора	8 - 1/2000 с

Діапазон ISO	фото 100-3200 (ручний) , фото 100-1600 (авто) , 100-6400 (відео авто)
Об'єктив	FOV 84° (еквівалент формату 24 мм) f/2.8-f/11 (діапазон зйомки: від 1 м до ∞)
Діапазон виявлення перешкод	0.5 м - 200 м
Точність позиціонування по горизонталі	±0,1 м (Режим RTK увімкнено) , ±0,5 м (з високоточною системою позиціонування) , ±0.3 м (Vision Positioning)
	50.2×40.2×66.2 мм 24±2 г USB-C: 1.2 Вт горизонтальна точність: 1 см + 1 ppm RTK вертикальна точність: 1.5 см + 1 ppm
Точність позиціонування по вертикалі	±0.1 м (Vision Positioning) , ±0,5 м (з позиціонуванням GNSS) , Режим RTK увімкнений: ±0,1 м
Максимальний розмір зображення	5280 x 3956
Режими відеозапису	4K: 3840x2160 30p , FHD: 1920x1080 30fps
Максимальний бітрейт відео	130/70 Mbps
Підтримувані файлові системи	exFAT
Дальність польоту, км	8
Дальність передачі сигналу пульта, км	15
Карти пам'яті	Micro SD до 512 ГБ , Micro SD 64 ГБ
Відео	MP4, MOV
Тип навігаційної супутникової системи	GPS, GALILEO, BEIDOU, ГЛОНАСС

Перед здійсненням польоту було виконане калібрування компаса згідно з інструкцією по експлуатації дрону. Також перед початком виконання аерофотозйомки були налаштовані режими роботи камери, використовуючи наступні діапазони параметрів, які рекомендовані виробником для хмарної погоди:

- Експозиція: +0.6;
- Режим зйомки: пріоритет діафрагми (A);
- Витримка: від 1/800;
- Діафрагма: від F4.0;
- ISO: 100.

Планування маршруту польоту і програмування польотного завдання і його передача на дрон здійснено в програмному забезпеченні DJI Pilot 2,

інтегрованому в пульт дистанційного управління квадрокоптера. Для забезпечення постобробки даних методом PPK необхідно виконувати політ з встановленою GNSS RTK антеною, але з вимкненим режимом отримання поправок через RTK – необроблені дані супутникової навігаційної системи, а також інформацію про позначку часу буде записано в файл з розширенням MRK.

Установочні значення для висоти та швидкості польоту вибирались для отримання GSD 2.5см/піксель і склали відповідно 91 метр та 6 м/сек.

Під час аерознімання отримано 402 аерофотознімки, центри проєкцій яких показано на схемі 3.4.

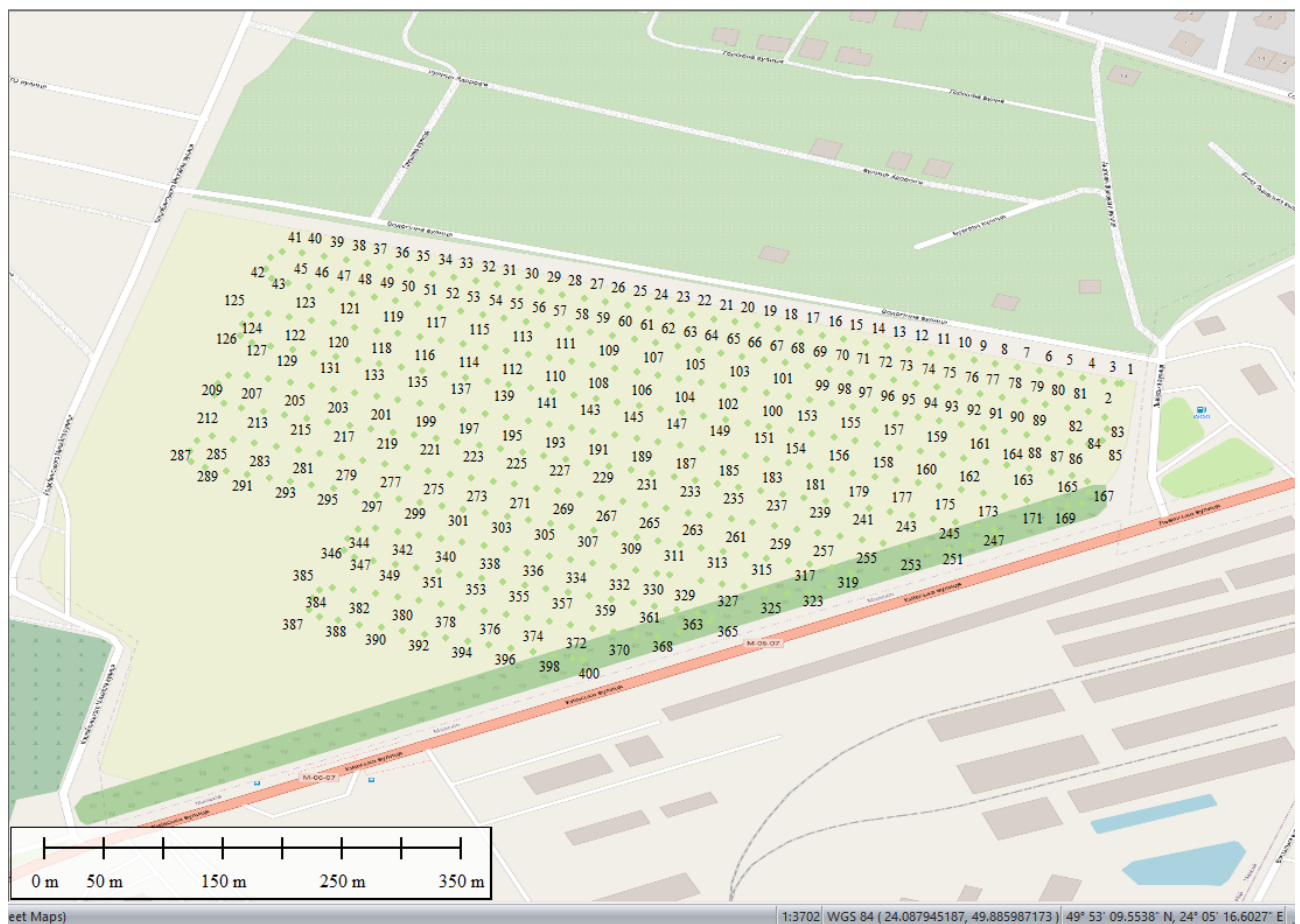


Рис.3.4. Покриття аерознімками об'єкта дослідження

Як і інші дрони DJI з підтримкою RTK, Mavic 3 Enterprise підтримує широкий набір робочих процесів обробки GNSS. В нашому робочому процесі Mavic 3 Enterprise було використано без локальної базової ГНСС-станції.

Навігаційні дані реєструвались і записувались в спеціальні файли для подальшого їхнього опрацювання в режимі РРК. Модуль RTK додає додаткові файли PPKNAV.nav, PPKOBS.obs і PPKRAW.bin до кожної папки місії. До імен цих файлів додаються дата і час отримання даних. Також записується зсув між камерою та антеною у файл з розширенням MRK (рис.3.5).

Ім'я	Дата	Тип	Розмір	Теги
DJI_202411031058_018_Peretyn_PPKNAV.nav	04.11.2024 11:11	Файл NAV	53 КБ	
DJI_202411031058_018_Peretyn_PPKOBS.obs	04.11.2024 11:11	Файл OBS	22 126 КБ	
DJI_202411031058_018_Peretyn_PPKRAW.bin	04.11.2024 11:11	Файл BIN	4 113 КБ	
DJI_202411031058_018_Peretyn_Timestamp.MRK	04.11.2024 11:11	Файл MRK	51 КБ	
DJI_20241103105932_0001_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 640 КБ	single
DJI_20241103105933_0002_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 712 КБ	single
DJI_20241103105935_0003_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 684 КБ	single
DJI_20241103105936_0004_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	11 088 КБ	single
DJI_20241103105938_0005_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 860 КБ	single
DJI_20241103105939_0006_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 612 КБ	single
DJI_20241103105941_0007_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 592 КБ	single
DJI_20241103105943_0008_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 580 КБ	single
DJI_20241103105944_0009_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 648 КБ	single
DJI_20241103105946_0010_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 508 КБ	single
DJI_20241103105947_0011_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 356 КБ	single
DJI_20241103105949_0012_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 248 КБ	single
DJI_20241103105950_0013_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 052 КБ	single
DJI_20241103105952_0014_V.JPG	03.11.2024 10:59	Файл JPG	10 448 КБ	single

Рис.3.5. Файли даних – навігаційні файли та файли аерознімків, отримані 11 березня 2024 року

```
DJI_202411031058_018_Peretyn_PPKNAV.nav: Блокнот
Файл Редагування Формат Вигляд Довідка
3.05 N: GNSS NAV DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
20241103 085345 UTC PGM / RUN BY / DATE
END OF HEADER

G20 2024 11 3 10 0 0 .369078014046E-03 -.341060513165E-12 .000000000000E+00
.147000000000E+03 -.101656250000E+03 .447875798682E-08 -.180304243360E+01
-.515580177307E-05 .384944281541E-02 .965222716331E-05 .515363274002E+04
.360000000000E+05 .782310962677E-07 .951243755692E-02 .167638063431E-07
.956323236941E+00 .190156250000E+03 -.248044582658E+01 -.786604193793E-08
.171792870148E-09 .100000000000E+01 .233900000000E+04 .000000000000E+00
.200000000000E+01 .000000000000E+00 -.838190317154E-08 .147000000000E+03
.319818000000E+05 .400000000000E+01 .000000000000E+00 .000000000000E+00
R 4 2024 11 3 8 45 0 .262266956270E-03 .181898940355E-11 .307500000000E+05
.932117285156E+04 -.442307472229E+00 .000000000000E+00 .000000000000E+00
.751908789062E+04 .305120182037E+01 .000000000000E+00 .600000000000E+01
.225424301758E+05 -.837773323059E+00 -.279396772385E-08 .000000000000E+00
E21 2024 11 3 8 40 0 -.626159482636E-03 -.221689333557E-11 .000000000000E+00
.520000000000E+02 .158156250000E+03 .252224791889E-08 .339941589052E+00
.740401446819E-05 .919476151466E-04 .113043934107E-04 .544063148308E+04
.312000000000E+05 -.149011611938E-07 -.287843309674E+01 .279396772385E-07
.965420818726E+00 .991250000000E+02 .229694508498E-01 -.517985861905E-08
-.119647840956E-09 .513000000000E+03 .233900000000E+04 .000000000000E+00
.312000000000E+01 .000000000000E+00 .000000000000E+00 .465661287308E-09
.319818000000E+05 .000000000000E+00 .000000000000E+00 .000000000000E+00
C 2 2024 11 3 8 0 0 .808832584880E-03 -.217541540337E-10 .000000000000E+00
< >
```

Окрім збору даних дроном, також потрібно збирати довідкові дані з найближчих довідкових станцій GNSS, таких як CORS або інших наземних приймачів. Довідкові дані мають включати ті самі сигнали GNSS та інформацію про час, що й дані GNSS дрона. Постобробка даних GNSS передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для обробки «сирих» навігаційних даних, зібраних приймачем, і порівняння їх з даними з найближчих опорних станцій для визначення точного місцезнаходження дрона в певний момент часу. Цей процес може підвищити точність інформації про місцезнаходження та траєкторію шляхом коригування помилок, викликаних такими факторами, як атмосферні умови та відхилення орбіти супутника.

```

3.05      OBSERVATION DATA  M: Mixed      RINEX VERSION / TYPE
          20241103 085345 UTC PGM / RUN BY / DATE
          MARKER NAME
          MARKER NUMBER
          MARKER TYPE
          OBSERVER / AGENCY
          REC # / TYPE / VERS
          ANT # / TYPE
          APPROX POSITION XYZ
          ANTENNA: DELTA H/E/N
G  8 C1C L1C D1C S1C C2W L2W D2W S2W      SYS / # / OBS TYPES
R  8 C1C L1C D1C S1C C2P L2P D2P S2P      SYS / # / OBS TYPES
E  8 C1C L1C D1C S1C C7Q L7Q D7Q S7Q      SYS / # / OBS TYPES
C  8 C2I L2I D2I S2I C7I L7I D7I S7I      SYS / # / OBS TYPES
2024 11 3 8 53 1.6000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2024 11 3 9 5 2.2000000 GPS TIME OF LAST OBS
G      SYS / PHASE SHIFT
R      SYS / PHASE SHIFT
E      SYS / PHASE SHIFT
C      SYS / PHASE SHIFT
0      GLONASS SLOT / FRQ #
C1C 0.000 C1P 0.000 C2C 0.000 C2P 0.000 GLONASS COD/PHS/BIS
          END OF HEADER

> 2024 11 3 8 53 1.6000000 0 45
G 3 24482951.087 128658762.041 3784.552 41.000 24482974.889 100253596.088 2948.962 35.000
G 4 21683220.472 113946089.150 2389.901 43.000 21683232.640 88789164.200 1862.507 43.000
G 6 22613986.125 118837289.531 2576.972 41.000 22614001.206 92600482.922 2007.892 42.000
G 7 21257711.986 111710027.668 -1578.520 47.000 21257719.902 87046774.393 -1229.795 42.000
G 9 20151370.870 105896172.372 767.841 48.000 20151381.502 82516494.635 598.540 43.000
G11 22607159.550 118801424.969 -77.975 44.000 22607171.540 92572537.311 -60.892 42.000
G16 22984428.786 120783985.717 169.641 40.000 22984443.528 94117397.991 132.187 33.000
G20 22816405.916 119901020.583 -2979.303 42.000 22816418.371 93429367.367 -2321.536 34.000
G26 24637914.917 129473134.859 2487.982 35.000 24637936.807 100888151.484 1938.562 35.000
G30 23152457.963 121666978.574 -3232.635 42.000 23152474.314 94805444.518 -2518.938 40.000
R 3 21923168.750 117356436.836 3023.272 44.000 21923181.365 91277228.246 2351.515 41.000
R 4 19382619.539 103793046.329 380.996 46.000 19382626.025 80727925.218 296.389 43.000
R 5 20875583.591 111591967.571 -2671.975 49.000 20875593.222 86793746.921 -2078.462 42.000
R13 21596718.533 115325277.555 2708.072 39.000
R14 20170598.350 107520629.647 -1946.931 48.000 20170613.217 83627157.013 -1514.227 44.000
R15 22952013.020 122648594.410 -4507.191 46.000 22952029.746 95393351.762 -3505.884 39.000
R20 21710523.266 116095950.702 1801.260 36.000 21710537.794 90296832.029 1400.844 40.000
R21 22885175.745 122463207.905 -1877.677 44.000 22885188.396 95249161.702 -1460.545 41.000
E 4 24303694.356 127716784.910 -1505.082 44.000 24303708.901 97860914.363 -1153.177 45.000
E 6 26186496.768 137610983.044 -2272.741 37.000 26186515.495 105442181.258 -1741.250 37.000
E 9 28559749.878 150082511.297 -2534.464 33.000 28559777.951 114998299.178 -1942.043 39.000

```

Рис.3.6. Навігаційні файли у форматі RINEX з уточнюючими параметрами (фрагмент)



Оцінка точності визначення координат центрів проекцій знімків, отримана після постоброблення навігаційних даних свідчить про те, що планові координати мають точність не гірше 0,02м, а висотні – не гірше 0,03м

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	32025.052	[2339]	-4,N	-34,E	82,V	49.88979426,Lat	24.08683460,Lon	360.081,Ellh	0.019587, 0.015104, 0.032814
2	32026.513	[2339]	5,N	-18,E	94,V	49.88979698,Lat	24.08681207,Lon	360.015,Ellh	0.019778, 0.015225, 0.033417
3	32028.024	[2339]	6,N	-18,E	94,V	49.88981378,Lat	24.08670716,Lon	359.857,Ellh	0.019543, 0.015114, 0.033413
4	32029.537	[2339]	4,N	-41,E	85,V	49.88983984,Lat	24.08654120,Lon	359.697,Ellh	0.019524, 0.015064, 0.033239
5	32031.046	[2339]	7,N	-32,E	89,V	49.88986535,Lat	24.08637923,Lon	359.373,Ellh	0.019752, 0.015336, 0.032918
6	32032.557	[2339]	7,N	-34,E	89,V	49.88989174,Lat	24.08621571,Lon	359.077,Ellh	0.019621, 0.015176, 0.033262
7	32034.063	[2339]	7,N	-35,E	88,V	49.88991806,Lat	24.08605225,Lon	358.782,Ellh	0.019485, 0.015005, 0.033044
8	32035.583	[2339]	7,N	-34,E	89,V	49.88994460,Lat	24.08588770,Lon	358.522,Ellh	0.021031, 0.016296, 0.035225
9	32037.077	[2339]	7,N	-33,E	89,V	49.88997051,Lat	24.08572629,Lon	358.242,Ellh	0.020667, 0.016015, 0.034493
10	32038.602	[2339]	7,N	-35,E	88,V	49.88999694,Lat	24.08556045,Lon	357.977,Ellh	0.020652, 0.015979, 0.034429
11	32040.104	[2339]	8,N	-35,E	88,V	49.89002277,Lat	24.08539694,Lon	357.708,Ellh	0.020364, 0.015779, 0.033845
12	32041.620	[2339]	8,N	-35,E	88,V	49.89004904,Lat	24.08523257,Lon	357.419,Ellh	0.020534, 0.015777, 0.033943
13	32043.118	[2339]	8,N	-35,E	88,V	49.89007526,Lat	24.08507067,Lon	357.130,Ellh	0.020312, 0.015672, 0.033830
14	32044.634	[2339]	8,N	-35,E	88,V	49.89010158,Lat	24.08490602,Lon	356.872,Ellh	0.020324, 0.015643, 0.033791
15	32046.153	[2339]	8,N	-36,E	88,V	49.889912818,Lat	24.08474114,Lon	356.583,Ellh	0.020154, 0.015544, 0.033634
16	32047.652	[2339]	8,N	-34,E	89,V	49.89015409,Lat	24.08457998,Lon	356.333,Ellh	0.020147, 0.015555, 0.033687
17	32049.151	[2339]	8,N	-34,E	89,V	49.89018031,Lat	24.08441768,Lon	356.108,Ellh	0.020189, 0.015516, 0.034021
18	32050.674	[2339]	9,N	-35,E	88,V	49.89020661,Lat	24.08425275,Lon	355.840,Ellh	0.020092, 0.015494, 0.033803
19	32052.171	[2339]	8,N	-34,E	89,V	49.89023299,Lat	24.08409089,Lon	355.562,Ellh	0.019960, 0.015381, 0.033513
20	32053.686	[2339]	7,N	-35,E	88,V	49.89025977,Lat	24.08392663,Lon	355.262,Ellh	0.019903, 0.015341, 0.033459
21	32055.179	[2339]	8,N	-34,E	89,V	49.89028545,Lat	24.08376507,Lon	355.006,Ellh	0.019829, 0.015309, 0.033442
22	32056.707	[2339]	7,N	-33,E	89,V	49.89031251,Lat	24.08360057,Lon	354.735,Ellh	0.019912, 0.015332, 0.033494
23	32058.207	[2339]	8,N	-34,E	89,V	49.89033849,Lat	24.08343807,Lon	354.469,Ellh	0.019778, 0.015286, 0.033354
24	32059.713	[2339]	8,N	-35,E	88,V	49.89036485,Lat	24.08327449,Lon	354.200,Ellh	0.019806, 0.015280, 0.033384
25	32061.217	[2339]	7,N	-32,E	89,V	49.89039099,Lat	24.08311214,Lon	353.905,Ellh	0.019777, 0.015223, 0.033297

Рис.3.7. Результати постобробки навігаційних даних (РПК) з оцінкою точності визначення координат центрів проекцій (фрагмент)

### 3.3. Методика фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання будівельного майданчика.

Зображення було оброблено в Agisoft Metashape 1.6.1 за допомогою методу розрахунку структури з руху (SfM) із користувальницькими параметрами, переліченими в таблиці 3.3 .

Табл. 3.3. Параметри Agisoft Metashape, які використовуються для обчислень.

Налаштування	Значення
Вирівняти фотографії	
-Точність	Високий
- Ліміт ключових точок	40 000
-Обмеження точки зв'язку	4000
Оптимізуйте вирівнювання камери	Підібрати всі константи (f, cx, cy, k1–k4, p1–p4)
Побудуйте щільну хмару	
-Якість	Високий
- Глибина фільтрації	Помірний
Цифрова модель висоти	
-Вихідні дані	Густа хмара
-Інтерполяція	Увімкнено
-Просунутий	
-Роздільна здатність	2,8 см/піксель (неявно)

Послідовність обробки — це послідовне виконання процедур в автоматичному режимі:

- обчислення розрідженої хмари 3D точок (зв'язкові точки стереопар),
- аеротріангуляція,
- виконання побудови фотограмметричної моделі,
- обчислення щільної хмари 3D точок,
- створення моделей видимої поверхні (DSM) та рельєфу (DTM).

РРК дані про координати центрів проєкцій знімків відомі і важливо ввести відповідні значення точності для всіх знімків (камер) на панелі «Прив'язка». В іншому випадку значення точності за замовчуванням (10 м) буде прийнято для всіх координат камер в блоці, ефективність даних, отриманих в результаті процесу РРК, буде втрачена і не буде отримана очікувана точність результатів

моделювання поверхні будівельного майданчика. Після вводу даних (знімків з геотегами) програмне забезпечення Metashape автоматично виконує збір зв'язкових точок в стереопарах і будує аеротріангуляцію для визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування аерознімків ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ). Далі програма розраховує для кожної зв'язкової точки координати в локальній Евклідовій системі і розраховує відповідні помилки. Для перемикання між значеннями помилок і розрахованими значеннями координат використовуємо кнопки «Перегляд розрахованих значень і Перегляд помилок» на панелі інструментів «Прив'язка». В таблиці червоним кольором буде підсвічуватись рядок, який відповідає точці з найбільшою помилкою.

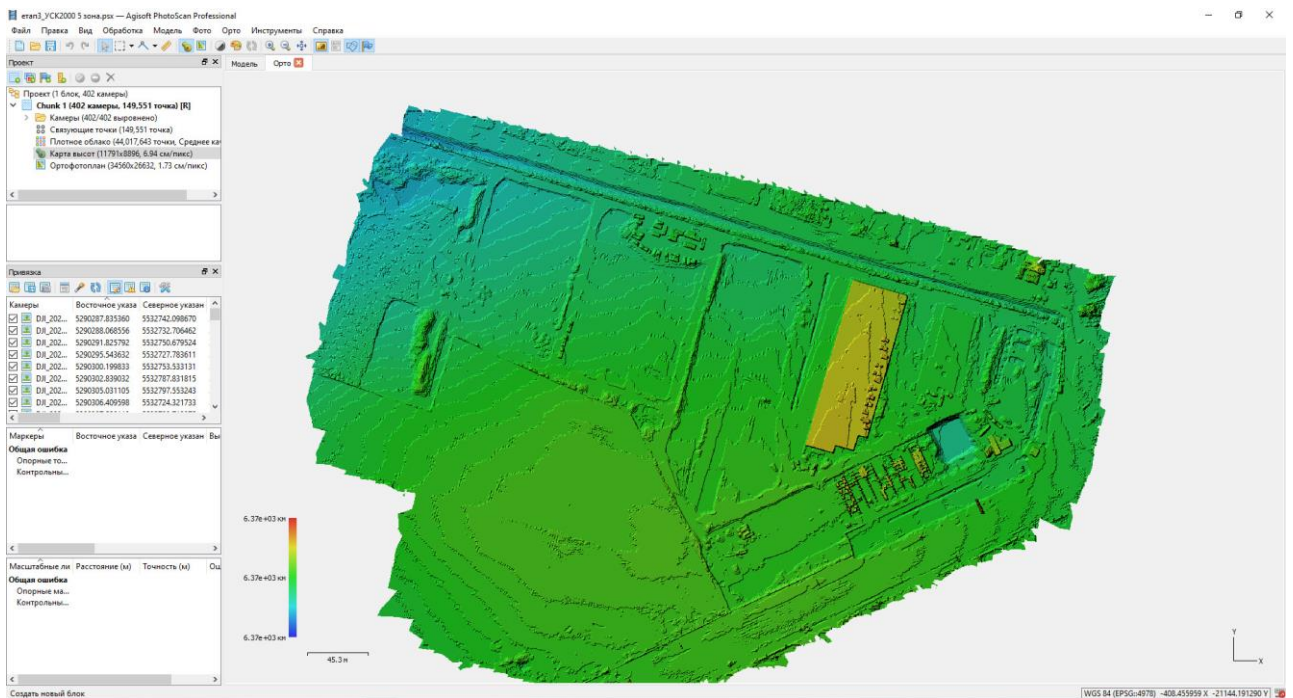


Рис.3.8. Результат фотограмметричного процесу – створена растрова модель видимої топографічної поверхні (DSM)

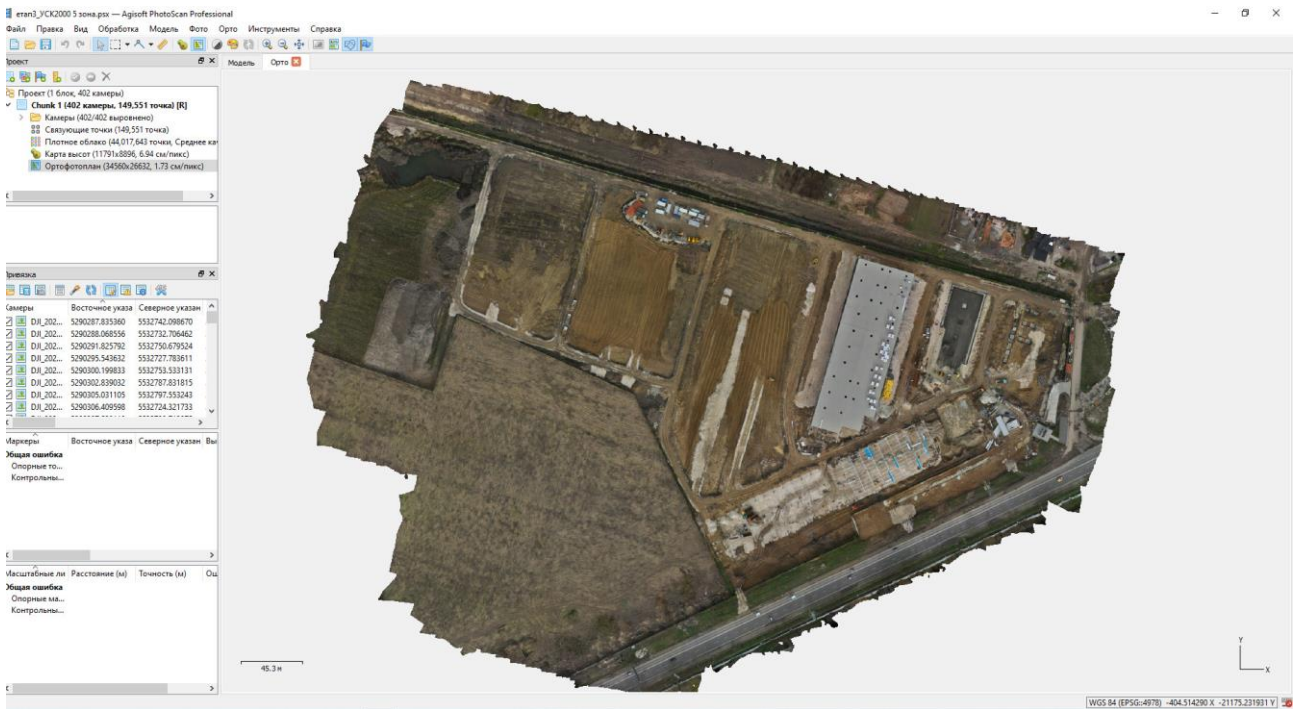
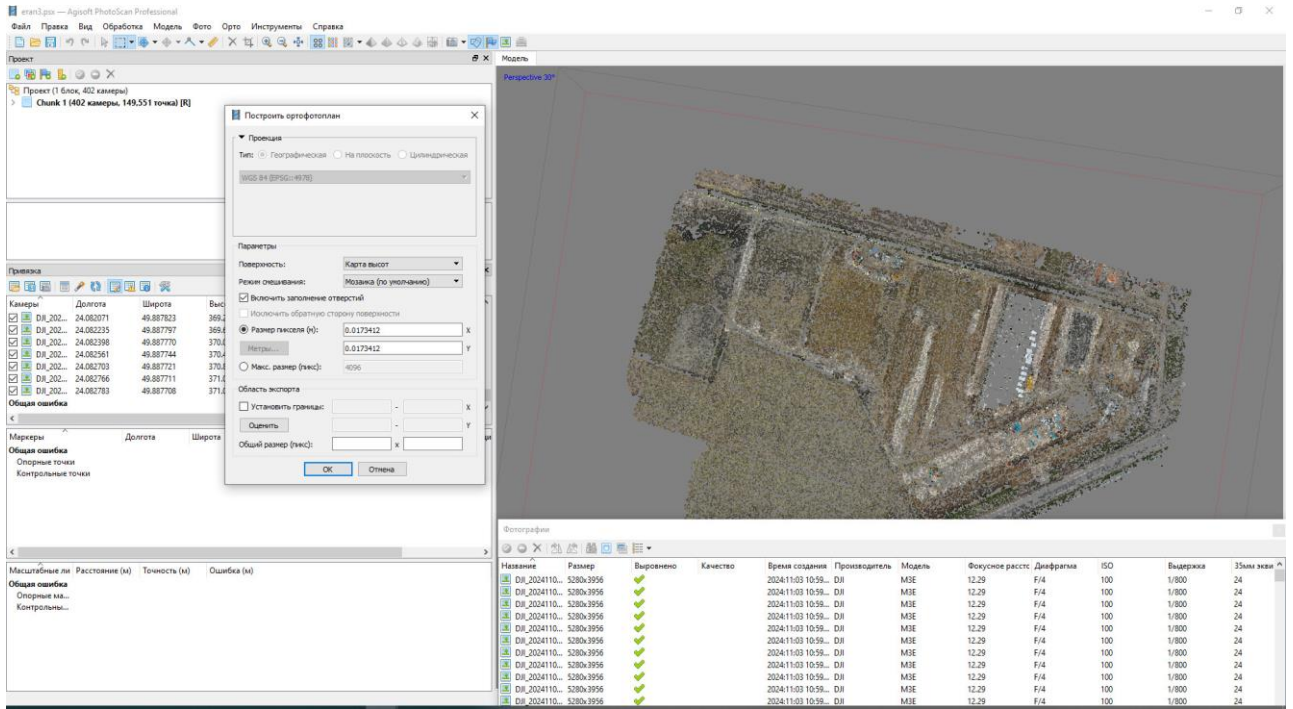


Рис.3. 9. Діалог задання параметрів створення ортофотоплану і результат його створення в програмі Metashape

### 3.4. Визначення об'ємів насипів та котлованів.

За завданням замовника вишукувальних робіт складалась картограма і відомості балансу земляних робіт.

Картограма земляних робіт — це креслення, що розробляється на основі топографічної моделі поверхні рельєфу і проекту вертикального планування та відображає існуючі фактично та проектні відмітки і горизонталі. Вона є невід'ємною частиною проекту вертикального планування території та використовується для маркування проектних відміток і площин при здійсненні вертикального планування рельєфу будівельного майданчика чи місцевості загалом. На картограмі графічно зображені ділянки насипів та виїмок землі.

Спочатку на плані відтворюється цифрова модель рельєфу (ЦМР) у виді пікетних точок заданої відповідно масштабу 1:500 щільності з підписами їх висот як показано на рис.3.10.

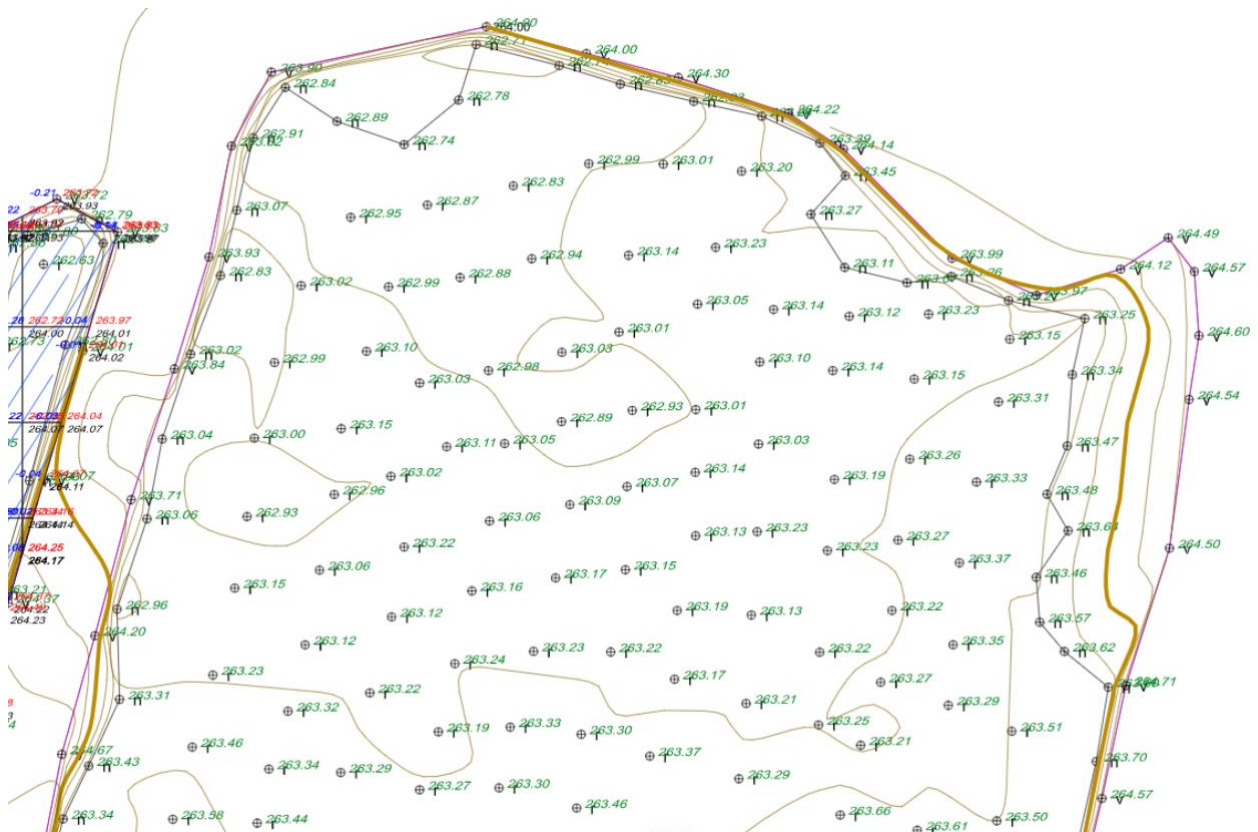


Рис.3.10. Фрагмент цифрової моделі рельєфу котлована (7 черга будівництва)

Далі створюється сітка правильних квадратів, в вузлах яких вказуються проектні відмітки та робочі відмітки (отримуються шляхом інтерполяції з існуючої ЦМР). Далі позначають лінію нульових робіт, яка відокремлює насипи від виїмок. Кожен квадрат має свій номер, а в його центрі може вказуватись об'єм насипу або виїмки. Частина відміток може бути додатною, інша — від'ємною. Приклад оформлення окремого вузла картограми та фрагмент показано на рис. 3.11

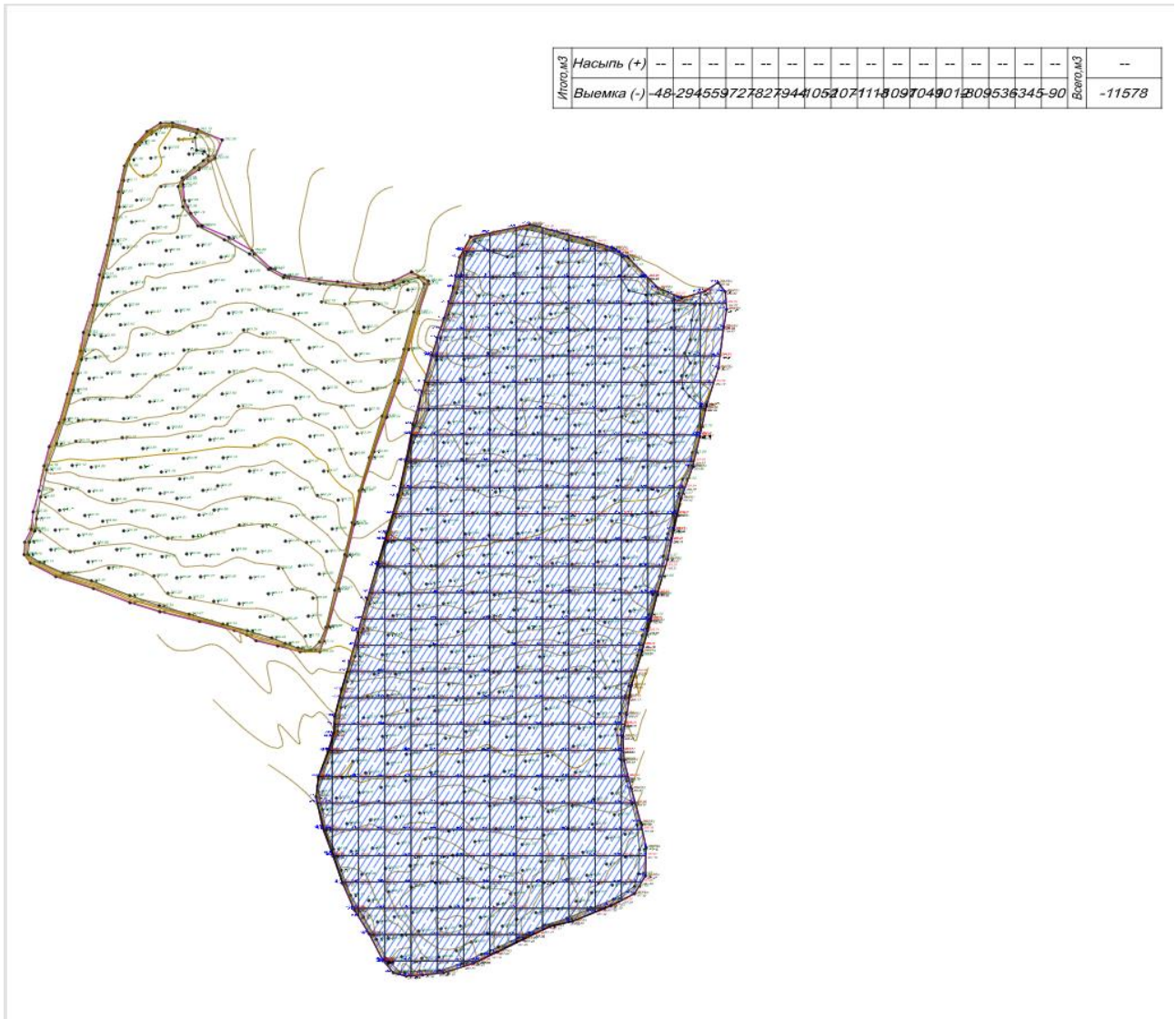


Рис.3.11. Приклад оформлення окремого вузла картограми земляних робіт

До картограми земляних робіт додається відомість обчислення об'ємів. В ній подають об'єми насипу і виїмки земляних мас окремо і також сумарний їхній баланс.

Нами складено картограми і відомості балансу земляних робіт з вказанням об'ємів для 7 та 8 черг будівництва виробничо-складського комплексу (рис.3.2). Результати цих вишукувальних робіт приведено нижче.

## 7 черга будівництва



Загальна площа насипу=0 м<sup>2</sup>

Загальна площа виїмки=14158 м<sup>2</sup>

Загальна площа 0-області=33 м<sup>2</sup>

Загальна площа картограми= 14190 м<sup>2</sup>

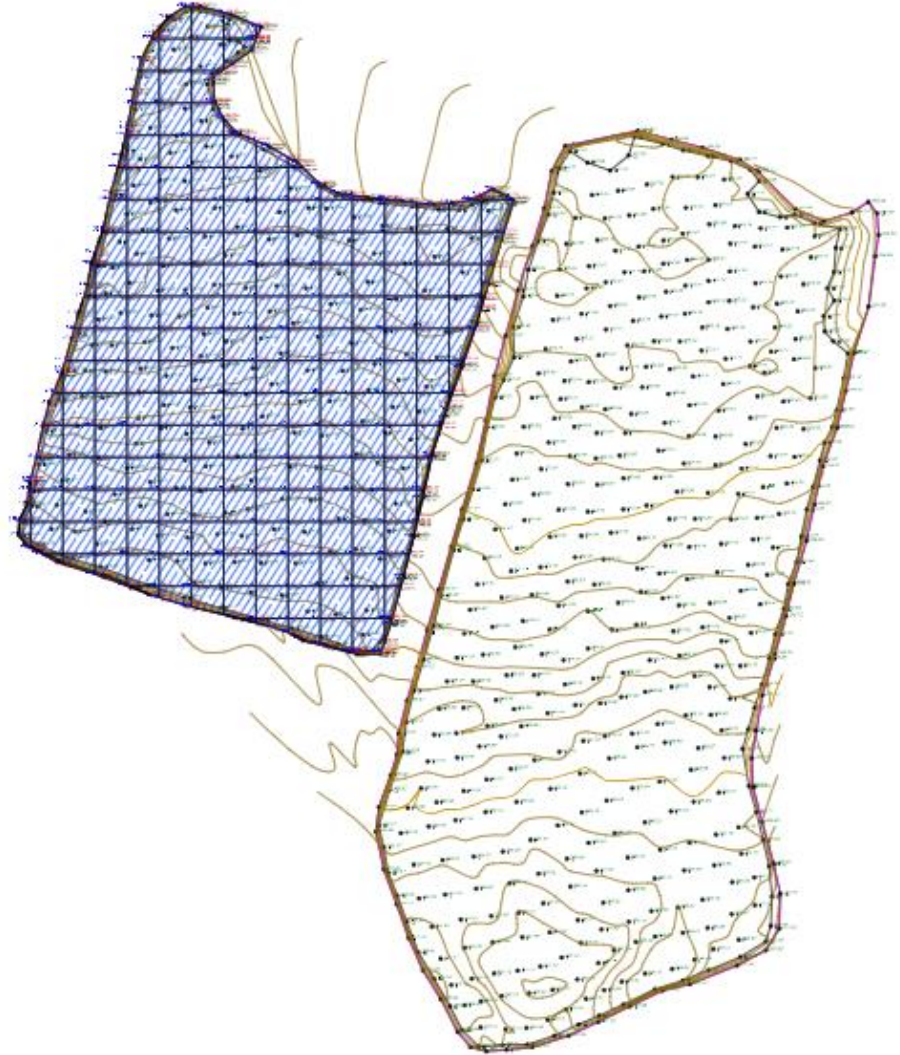
**Відомість обчислення об'ємів земляних робіт**

Итого,м3	Насыпь (+)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	Всего,м3	--
	Выемка (-)	-48	-294	-559	-727	-827	-944	-1052	-1071	-1118	-1097	-1049	-1012	-809	-536	-345	-90		

## 8 черга будівництва

Итого, м3	Насыпь (+)	--	--	+1	+1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	Всего, м3	+2
	Выемка (-)	-9	-132	-330	-535	-743	-828	-810	-668	-542	-490	-474	-538	-509	-399	-249	-93	-7349

Общая площадь насыпи = 7 м<sup>2</sup>  
 Общая площадь выемки = 8708 м<sup>2</sup>  
 Общая площадь 0-области = 24 м<sup>2</sup>  
 Общая площадь картограммы = 8738 м<sup>2</sup>



Загальна площа насипу=7 м<sup>2</sup>  
 Загальна площа виїмки=8708 м<sup>2</sup>  
 Загальна площа 0-області=24 м<sup>2</sup>  
 Загальна площа картограми= 8738 м<sup>2</sup>

### Відомість обчислення об'ємів земляних робіт

Итого, м3	Насыпь (+)	--	--	+1	+1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	Всего, м3	+2
	Выемка (-)	-9	-132	-330	-535	-743	-828	-810	-668	-542	-490	-474	-538	-509	-399	-249	-93	-7349



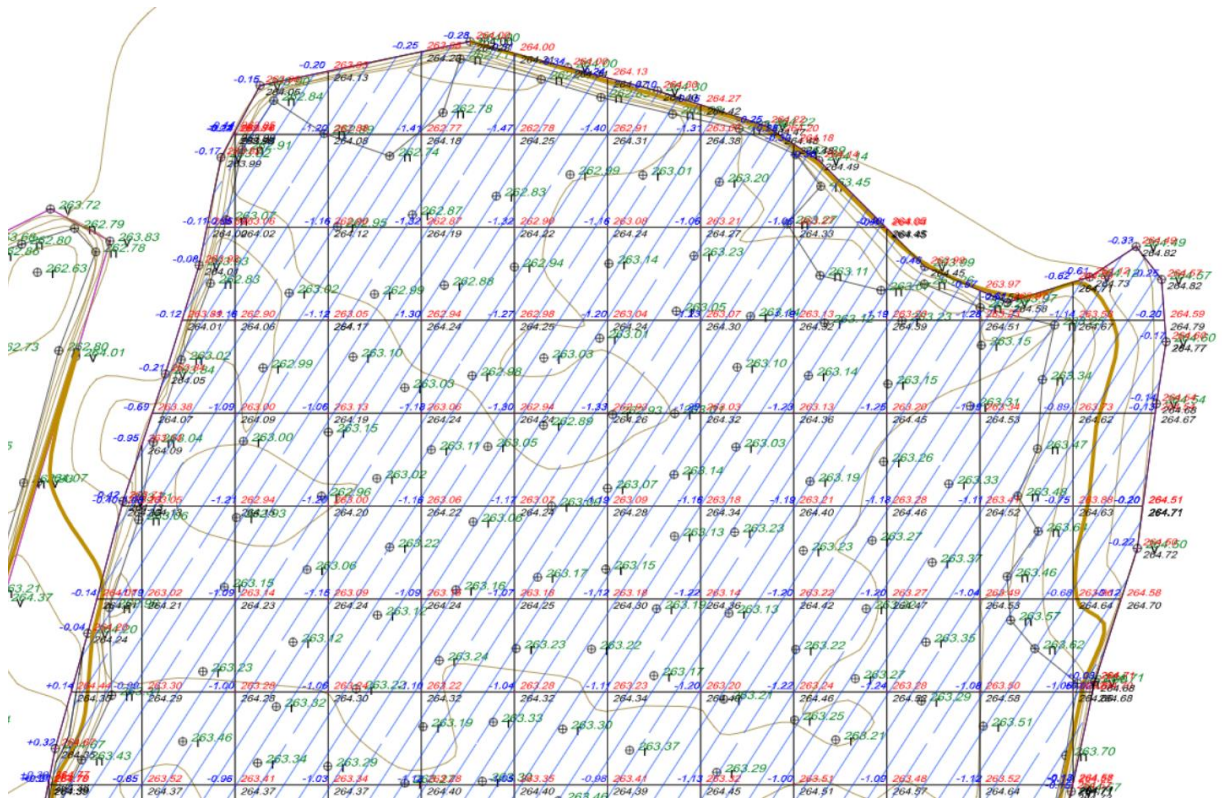


Рис.3.14. Північна частина (збільшений фрагмент) картограми земляних робіт котловану 7 черги будівництва

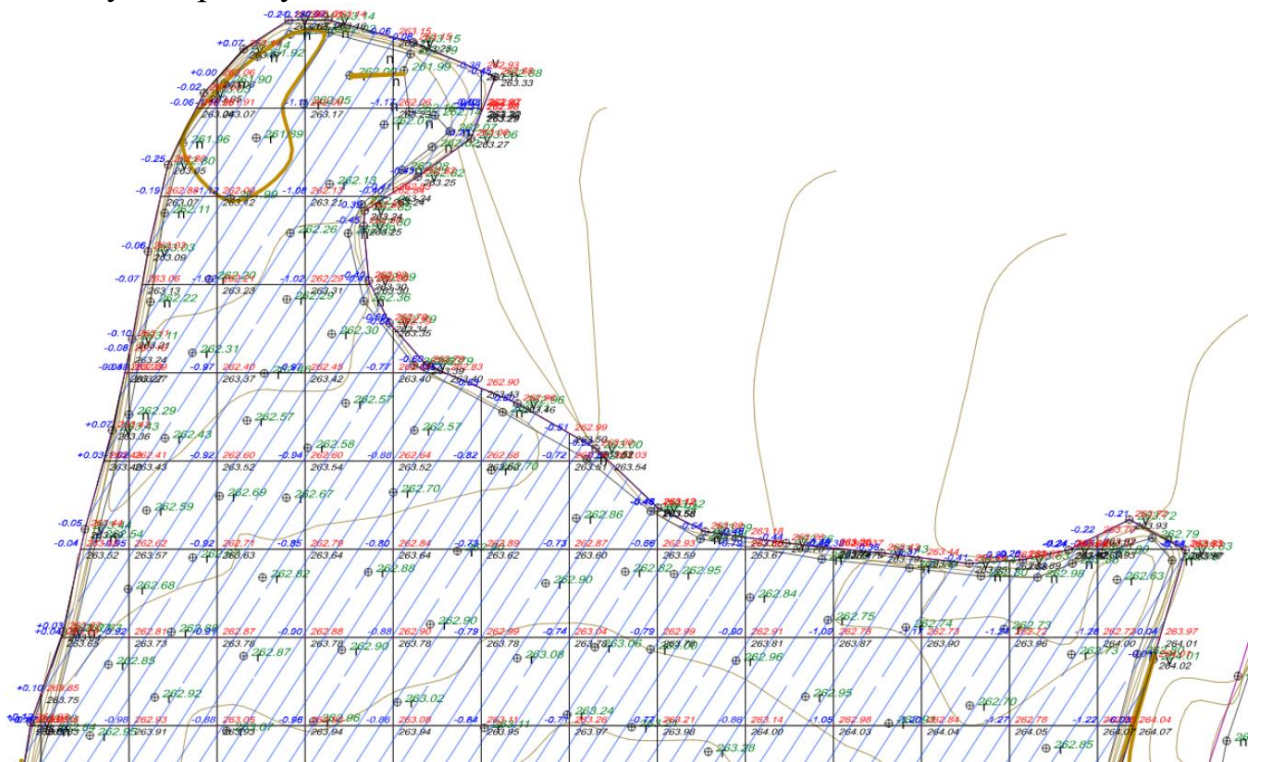


Рис.3.15. Північна частина (збільшений фрагмент) картограми земляних робіт котловану 8 черги будівництва

#### 4. Охорона довкілля

Ґрунт (від нім. Grund — земля, основа) — самостійне природно-історичне органо-мінеральне тіло, що виникло у поверхневому шарі літосфери Землі в результаті тривалого впливу біотичних, абіотичних і антропогенних факторів, має специфічні генетико-морфологічні ознаки і властивості, що створюють для росту і розвитку рослин відповідні умови.

В інженерній геології Ґрунт — будь-які гірські породи, ґрунти і техногенні утворення, які мають певні генетичні ознаки і розглядаються як багатокомпонентні динамічні системи, на які впливає інженерно-господарська діяльність людини.

Поряд з природними існують штучні, докорінно перетворені ґрунти і ґрунтоподібні суміші: у містах, на звалищах, рекультивованих кар'єрах тощо.

Ґрунт є дуже вразливою системою, що формувалася протягом століть, але може бути зруйнована неправильними діями людини за лічені роки, місяці й навіть дні. Деградація ґрунтового середовища зумовлена комплексом антропогенних і природних процесів зміни фізико-хімічних, механічних та інших характеристик ґрунту. Зазвичай першопричиною порушення ґрунтів є діяльність людини – механічна обробка ґрунту, будівельна трансформація, транспортне переущільнення, випас худоби, зрошення, забруднення тощо). Наслідки цих первинних змін можуть багаторазово посилюватися під впливом природних чинників – вітру, дощових потоків тощо. Ґрунт є дуже вразливою системою, що формувалася протягом століть, але може бути зруйнована неправильними діями людини за лічені роки, місяці й навіть дні. Найбільш істотними причинами деградації ґрунтового середовища в Україні є різні види ерозії, вторинне засолення ґрунтів, підтоплення і висушування земель, техногенне забруднення ґрунтів.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Гавриленко О.П., Шищенко П.Г. Гоекологічні проблеми України : підручник. Київ : ПВТП «LAT&K», 2022. 379 с.

Ґрунт є найважливішим компонентом біогеоценозів і виконує в ньому **біогеоценотичні функції**. Ґрунт це умова існування і еволюції організмів:

- життєвий простір, житло і притулок, механічна опора, депо насіння;
- джерело елементів живлення; депо вологи, елементів живлення та енергії; стимулятор та інгібітор біохімічних та інших процесів;
- адсорбатор речовин із атмосфери і ґрунтових вод;
- сигнал для сезонних та інших біологічних процесів, пусковий механізм для деяких сукцесій;
- регулятор чисельності, складу і структури біоценозів;
- У ґрунті акумулюються і трансформуються речовини і енергія, що знаходиться чи поступає до нього. Ґрунт виконує санітарні функції. Ґрунт є буфером і захисним біогеоценотичним екраном.

Деградація ґрунту - одна з головних екологічних проблем, що пов'язана з погіршенням стану земельних ресурсів. За історичний час внаслідок прискореної ерозії, дефляції і інших негативних процесів людство втратило земельних ресурсів. Навіщо дотримуватися правила сівозміни, якщо можна з року в рік вирощувати найприбутковіші культури — соняшник, кукурудзу, сою. Виснажені ґрунти легко піддаються ерозії — їх просто відносить вітром. За оцінками екологів, за останні 100 років ми втратили третину гумусу. А темпи його відтворення — 10 см за 2 тисячоліття. Ерозія ґрунтів на території міст розвивається під впливом зосередженого поверхневого стікання, а іноді в результаті витоків із водоносних комунікацій. Найбільш інтенсивно ерозія ґрунтів відбувається під час будівельних робіт внаслідок розпушення і вилучення ґрунтів. Інтенсивність ерозії в період будівництва у 10 разів вища, ніж на землях сільськогосподарського використання. Вміст зважених часток у водних потоках на території будівництва підвищується у десятки разів.

До основних проблем, пов'язаних з деградацією земель в Україні відноситься забруднення землі — одна з п'яти найбільших екологічних проблем України. Стан вітчизняних ґрунтів стає вже не аграрним питанням, а проблемою

екологічної безпеки. В Україні — близько 8% світового запасу чорнозему. Але все це дуже вичерпний ресурс. Проблемою в Україні є також надмірна розораність ґрунтів. В Україні господарським використанням зайнято 92% території. Рівень розораності становить понад 54%, в той час як в розвинених країнах Європи — не перевищує 35%. Фактична лісистість території України становить 16%, що недостатньо для забезпечення екологічної рівноваги (середній показник європейських країн — 25-30%). Найбільше сільськогосподарських угідь обробляється у Одеській, Запорізькій і Харківській областях (більше 2,2 млн га у кожній). Найменше земель обробляється у Закарпатській і Чернівецькій областях – менше за 500 тис га.

Важливою екологічною проблемою є хімічне забруднення ґрунтів.<sup>2</sup> *Забруднення ґрунтів* є наслідком надходження у ґрунт нехарактерних для нього речовин або перевищення за певний час середнього багаторічного природного рівня концентрації цих речовин. Забруднення відбувається тоді, коли у ґрунт потрапляють шкідливі хімічні речовини, відходи аграрного і промислового виробництва, побутові відходи тощо. Оскільки самоочищення ґрунтів практично не відбувається або швидкість його дуже мала, токсичні речовини накопичуються, що призводить до поступової зміни хімічного складу ґрунтів. З ґрунту токсичні речовини потрапляють у організми тварин і людей.

Унаслідок забруднення ґрунтів змінюється їх структура, руйнуються деякі мінерали, що негативно впливає на життєдіяльність ґрунтової мікрофлори, на біологічну активність ґрунтів та їхню родючість. Ґрунти забруднюються з атмосфери за рахунок як природних, так і антропогенних джерел. У гонитві за врожаєм, земля щедро поливається пестицидами. Причому особливість українських ґрунтів — їх високобуферність, що означає терпимість. Вони багато в себе вбирають, а потім сотнями років будуть віддавати це в продукцію. Не варто забувати і про проблему важких металів в ґрунті — перш за все, навколо

---

<sup>2</sup> Екологія ґрунтів: навчальний посібник / Р.М. Панас.– Львів: «Новий Світ-2000», 2021. –481 с.

промислових міст, на узбіччях доріг і в зонах екологічних катастроф.<sup>3</sup> В Україні досі немає належного обліку отруень хімічними засобами для рослин — пестицидами.

Всі вище зазначенні чинники згубно впливають на екологічну ситуацію в Україні і викликають такі негативні наслідки як парниковий ефект, кислотні дощі, руйнування озонового шару. У разі подальшого зберігання подібного стану речей наша держава ризикує скотитися в плані екологічної небезпеки для життя людей на рівень африканських країн. Тому ключове завдання активістів, екологічних організацій та громадськості - тримати основні екологічні проблеми в фокусі суспільної уваги, добиватися від керівництва держави реального покращення ситуації з охороною навколишнього середовища.

Антропогенний вплив на компоненти геологічного середовища міст виявляється у таких аспектах: – зростанні інтенсивності вивітрювання завдяки зміні складу атмосферного повітря (випадіння кислотних дощів і кислотних рос); – зміні рівня ґрунтових вод та їх складу, що призводить до зміни властивостей порід несучої основи; – зміні складу літогенної основи міських територій завдяки відсипанню і наміванню техногенних відкладів й аерозольних випадань з атмосфери; – зміні характеристик фізичних полів у межах міських агломерацій. Техногенний вплив надає геологічному середовищу додаткову кількість енергії через статичні (вага споруд), динамічні (вібрація), температурні та електричні поля.

На урбанізованих територіях, порівняно з природними, антропогенний фактор ґрунтоутворення можна вважати переважаючим. Міський ґрунт (урбанозем) – це будь-який ґрунт, що функціонує у міському навколишньому середовищі, але деякі вчені вважають, що він перетворюється антропогенно. Якщо дивитися на переріз міських ґрунтів, то можна виділити відсутність виражених горизонтів, підвищену густину і знижену пористість, мозаїчний характер формування, новоутворення і включення – сміття.

---

<sup>3</sup> Екологія міських систем : конспект лекцій / укладач І. Ю. Аблеева. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 178 с.

## Висновки та пропозиції

В магістерській кваліфікаційній роботі проаналізовано теоретичні засади прямого визначення координат центрів проекцій аерознімків засобами глобальних навігаційних супутникових систем. Сучасні моделі безпілотників оснащуються ГНСС-обладнанням з підтримкою режимів роботи RTK PPK. Такого класу квадрокоптер DJI Mavic 3E Enterprise було використано нами для знімання з подальшим опрацюванням вимірів GPS за протоколом PPK майданчика нового будівництва виробничо-складського комплексу з приміщеннями громадського призначення на земельній ділянці кадастровий номер 4622785700:03:001:0255 на вулиці Київській в с. Малехів Львівського району Львівської області. 402 знімки були опрацьовані в програмному забезпеченні Agisoft Metashape 1.6.1 за допомогою автоматизованого методу розрахунку структури з руху (SfM) і отримано цифрову модель рельєфу та ортофотоплан. Виконано розрахунки об'ємів вийнятих земляних мас для котлованів двох черг будівництва, побудовано відповідні картограми земляних робіт.

Всі роботи виконано в стислі терміни, з високою точністю. Підтверджено високу ефективність БПЛА для оперативного збору високоточних геоданих при здійсненні інженерно-геодезичних вишукувань у будівництві.

Дано пропозиції щодо охорони навколишнього середовища при виконанні інженерно-геодезичних вишукувань на будівельних майданчиках.

## Бібліографічний список

1. Баран П.І. Інженерна геодезія: Монографія / П.І. Баран. – К.: ПАТ «ВІПОЛ», 2012. – 618 с.
2. Батракова А.Г., Кузьмін В.І. Інженерно-геодезичний моніторинг і контроль в будівництві, частина І. Геодезичні роботи при будівництві мостових переходів: навч.посіб. Харків: ХНАДУ, 2018. 116 с.
3. Волосецький Б.І. Геодезія в природокористуванні: навч.посібник. – Львів: В-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 288с.
4. Горішний П. Морфологічний аналіз рельєфу : навч. посібник. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2022. – 120 с.
5. ДБН А.2.1-1-2008 "Інженерні вишукування для будівництва". Наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 05.02.2008р. № 56
6. ДСТУ 2635-94 Інженерна фотограмметрія. Загальні вимоги. Чинний від 01.07.93 ДП "УкрНДНЦ" Наказ від 29.06.1994 № 163. <http://uas.org.ua>
7. Електронна довідкова система PIX4D: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809>
8. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). Наказ Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 9 квітня 1998 р. N 56
9. Яка відносна та абсолютна точність картографування дронами? <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558889>
10. Direct Georeferencing for Photogrammetry Using Inertial Labs INS-B (Пряма геореференція для фотограмметрії з використанням інерційних пристроїв INS-B). 27 березня 2020 р. ) <https://inertiallabs.com/direct-georeferencing-for-photogrammetry-using-inertial-labs-ins-b/>

11. E. Cledat, L.V. Jospin, D.A. Cucci, J. Skaloud. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 167, pp.24-38. [https://hal.science/hal-04424524v1/file/Cledat\\_2020\\_mapping\\_Quality.pdf](https://hal.science/hal-04424524v1/file/Cledat_2020_mapping_Quality.pdf)
12. Förstner, W., Wrobel, B.P., 2015. *Photogrammetric Computer Vision – Statistics, Geometry, and Reconstruction*. Springer. URL <http://www.ipb.uni-bonn.de/bookpcv/>
13. He Zhang, Emilien Aldana-Jague, François Clapuyt, Florian Wilken, François Clapuyt, and Kristof Van Oost (2019). Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Surface Change Detection. <https://esurf.copernicus.org/preprints/esurf-2019-2/esurf-2019-2-manuscript-version6.pdf>
14. Colomina, P. Molina (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 92, 2014, Pages 79-97, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
15. Kolb I., Vivat A., Nazarchuk N., Pashchetnyk O. Methodology of 3D modeling based on aerial images from a drone with simplified geodetic reference [Електронний ресурс] // Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment : XVI International scientific conference, November 15-18, 2022, Kyiv, Ukraine. – 2022.
16. M. Bäumker i FJ Heimes, *New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System* , Proceedings of OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, 2002
17. M. Bäumker i FJ Heimes, *New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System* , Proceedings of OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, 2002 (400 KB)



- 18.M. Rabah, M. Basiouny, E. Ghanem, A. Elhadary. Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. Volume 7, Issue 2, December 2018, Pages 220-226
- 19.Ostrovskyi, A., Kolb, I., Vivat, A., Lozynskyi, V., & Zhyvchuk, V. (2021). Simplified method of obtaining data for calculating the volume of earthworks based on aerial survey materials from UAVs. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021» (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- 20.Piatti, E.J., Lerma, J.L., 2013. Virtual worlds for photogrammetric image-based simulation and learning. *Photogram. Rec.* 28, 27–42.  
<https://doi.org/10.1111/phor.12001>.
- 21.Pix4D White paper– How accurate are UAV surveying methods?  
<https://data.pix4d.com/misc/KB/documents/Pix4D+White+paper+How+accurate+are+UAV+surveying+methods.pdf>
- 22.Rehak, M., Skaloud, J., 2016. Applicability of new approaches of sensor orientation to micro aerial vehicles. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial. Inf. Sci.* III-3, 441–447.
- 23.Štroner, M., Urban, R., Seidl, J., Reindl, T., & Brouček, J. (2021). Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without GCPs. *Remote Sensing*, 13(7), 1336. <https://doi.org/10.3390/rs13071336>
- 24.Yaw, Pitch, Roll and Omega, Phi, Kappa angles and conversion Pix4D product documentation. (January 2021).  
[https://data.pix4d.com/misc/KB/documents/Pix4D\\_Yaw\\_Pitch\\_Roll\\_Omega\\_to\\_Phi\\_Kappa\\_angles\\_and\\_conversion.pdf](https://data.pix4d.com/misc/KB/documents/Pix4D_Yaw_Pitch_Roll_Omega_to_Phi_Kappa_angles_and_conversion.pdf)
- 25.Yaw, Pitch, Roll, and Omega, Phi, Kappa angles and conversion - Pix4D companion notes.  
[https://data.pix4d.com/misc/KB/documents/Pix4D\\_Yaw\\_Pitch\\_Roll\\_Omega\\_to\\_Phi\\_Kappa\\_angles\\_and\\_conversion.pdf](https://data.pix4d.com/misc/KB/documents/Pix4D_Yaw_Pitch_Roll_Omega_to_Phi_Kappa_angles_and_conversion.pdf)