

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Освітнього ступеня «Магістр»

на тему: “ Дослідження впливу щільності опорної геодезичної мережі на  
точність визначення об’ємів земляних робіт за матеріалами аерознімання з  
безпілотних літальних апаратів ”

Виконав: студент 6 курсу, групи ЗВ-63

Спеціальності 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

Якимів Назар Петрович

(Прізвище та ініціали)

Керівник: Колб І.З.

(Прізвище та ініціали)

Рецензент: \_\_\_\_\_

(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024





УДК 528.9

Дослідження впливу щільності опорної геодезичної мережі на точність визначення об'ємів земляних робіт за матеріалами аерознімання з безпілотних літальних апаратів. Якимів Назар Петрович. Магістерська кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет природокористування, 2024, – 64 с. текстової частини, 6 таблиць, 23 рисунки, 26 літературних джерел.

В кваліфікаційній роботі подаються наукові положення та методологічних основи здійснення фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання будівельного майданчика з БПЛА, досліджено вплив умов геодезичного забезпечення на якість цифрового моделювання котлованів, створено цифрову модель рельєфу для розрахунку об'ємів земляних робіт. Приведено порівняння точності визначення об'ємів земляних робіт за цифровими моделями рельєфу, створеними за результатами наземного лазерного сканування та фотограмметричним опрацюванням аерознімків з БПЛА.

Розглянуті питання охорони довкілля та охорони праці.

**Ключові слова:** *інженерно-геодезичні вишукування, аерознімання з БПЛА, цифрова модель рельєфу, визначення об'ємів земляних робіт.*

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
<b>1 Геодезичне забезпечення будівництва із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).</b>	
1.1. Завдання і зміст геодезичного забезпечення у будівництві.	8
1.2. Цифрова модель місцевості (об'єкта) інженерного призначення.	12
1.3. Застосування БПЛА для інженерно-геодезичних вишукувань.	17
<b>2 Розділ 2. Технології геодезичного забезпечення аерознімання з безпілотних літальних апаратів.</b>	
2.1. Забезпечення фотограмметричних проектів опорною геодезичною інформацією.	25
2.2. Позиціонування центрів проекцій аерознімків за технологіями RTK, PPK, Cloud PPK.	26
2.3. Планування наземної опорної мережі розпізнавальних знаків	29
2.4. Фотограмметрична модель та її зовнішнє орієнтування.	37
<b>3 Експериментальне дослідження впливу опорної геодезичної мережі на точність визначення об'ємів земляних робіт за матеріалами аерознімання з БПЛА</b>	
3.1. Методика експериментальних робіт	43
3.2. Фотограмметричне опрацювання аерознімків.	48
3.3. Оцінка результатів визначення об'єму котлована.	52
<b>4 ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ.</b>	54
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ.</b>	57
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.	60
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.	62

## ВСТУП

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для аерознімання будівельних майданчиків широко застосовується практично на всіх етапах геодезичного забезпечення будівництва. Особливо ефективним цей метод збору просторових даних є при виконанні виконавчих знімань, зокрема при оперативному контролі ведення земляних робіт. Всі етапи збору та опрацювання даних автоматизовані. Актуальним завданням для забезпечення ефективності аерознімання є забезпечення фотограмметричного проекту опорною геодезичною інформацією. При цьому якість такої геодезичної опори визначається за кількісними (кількість опорних наземних точок, контрольних промірів довжин, кутів, перевищень) та точністю визначення координат, відстаней, кутів тощо.

Завданням даної кваліфікаційної роботи є систематизація наукових положень та методологічних основ здійснення фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання будівельного майданчика з БПЛА, дослідження впливу умов геодезичного забезпечення на якість цифрового моделювання котлованів, створення цифрової моделі для розрахунку об'ємів земляних робіт.

Методологічною основою дослідження є літературний аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних вчених з проблем застосування БПЛА в галузі будівництва а також аналіз вимог нормативної документації щодо точності виконання виконавчих знімань котлованів і визначення об'ємів земляних робіт.

Предметом досліджень є методика забезпечення опорною геодезичною інформацією аерознімальних робіт з борту БПЛА для збору просторової інформації, цифрового моделювання рельєфу, визначення об'ємів.

Об'єктом досліджень є технологія виконання аерознімання з безпілотного літального апарата будівельного майданчика та опрацювання аерознімків для створення цифрової моделі котловану і обчислення об'ємів земляних робіт.

## **Розділ 1. Геодезичне забезпечення будівництва із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).**

### **1.1. Завдання і зміст геодезичного забезпечення у будівництві.**

Виконання топографічного знімання в сучасних умовах здійснюється із застосуванням новітніх технологій: супутникового визначення місцеположення точок місцевості (ГНСС – глобальні навігаційні супутникові системи), електронних тахеометрів (включаючи роботизовані), засобів отримання геопросторової інформації на основі систем оптико-електронного сканування місцевості (сканери, лідари), цифрового аерознімання з пілотованих та безпілотних літальних апаратів, космічних систем високого і надвисокого розрізнення. Програмні засоби застосовують методи обробки цифрових зображень, методи геоінформаційного моделювання геосистем. Перелічені методи і засоби за уніфікованими правилами дозволяють формувати і використовувати інфраструктуру геопросторових даних, інтегрувати бази топографічних даних в системи автоматизованого проектування, технології інформаційного моделювання в будівництві (BIM) тощо. Проте актуальним залишається обґрунтування методів, засобів та технологічних схем топографічного знімання для отримання продукції з необхідною та достатньою точністю, актуальністю, оперативністю та вартістю.

Встановимо термінологічні особливості, які важливі для розуміння загальних положень геодезичного забезпечення будівництва та положень фотограмметричної технології застосування БПЛА в цій галузі.

У відповідності до положень ДБН В.1.3-2:2010 "Геодезичні роботи у будівництві" [17] встановлено такі терміни.

- геодезичне забезпечення - Комплекс організаційних, технологічних, технічних та інших заходів, що спрямовані на забезпечення відповідності геометричних параметрів об'єктів будівництва вимогам проектної та нормативної документації.



- геодезичні роботи у будівництві - роботи з визначення просторового положення споруд, визначення форм та геометричних параметрів будівель, споруд та території забудови, які виконуються геодезичними методами, геодезичними приладами та інструментами.
- Геодезичний контроль - комплекс геодезичних робіт, спрямованих на забезпечення дотримання проектних просторових та геометричних параметрів елементів, конструкцій, частин та будівлі (споруди) в цілому.

ДБН визначає термін «опорна геодезична мережа» - це геодезична мережа заданого класу точності (державна геодезична мережа, геодезична мережа згущення, спеціальна інженерно-геодезична мережа), яка є основою для подальшої побудови геодезичної розмічувальної мережі будівельного майданчика. Натомість для фотограмметричної технології важливим є поняття опознак або опорна точки – це надійно розпізнана і позначена на аерофотознімку контурна точка, координати якої на місцевості отримані в результаті геодезичної прив'язки.

Особливості проведення інженерно-геодезичних робіт в умовах діючого будівельного майданчика описуються в роботі [11].

- проектування результатів на поверхню, що має середню висоту будівельного майданчика, а не на поверхню референц еліпсоїда, тому що поправки за перехід до поверхні референц-еліпсоїда можуть суттєво спотворити в кінцевому результаті параметри споруди;
- створення геодезичних мікромережі, що висуває певні вимоги під час вимірювань;
- постійна небезпека втрати закріплених геодезичних пунктів через земляні роботи, рух технологічного транспорту, зведення та руйнування тимчасових споруд.

Значну частину будівельного процесу займають земляні роботи. При їх виконанні може виникати і виникає ряд труднощів, пов'язаних з підрахунком об'ємів переміщення земляних мас, контролю правильності розташування та

геометрії фронту земляних робіт. Щоб уникнути подібного роду неприємностей, контроль над виконанням робіт має бути покладено на геодезичну службу. Тільки геодезист зможе коректно дотримати геометрію котловану будь-якої складності, в плані і по висотних відмітках, підрахувати обсяги земляних робіт і скласти відповідну документацію - найчастіше це виконавча зйомка котловану, яка дозволяє вирішувати низку конфліктних питань, особливо при підписанні актів виконаних робіт.

Традиційно геодезичний супровід земляних робіт вимагає значних затрат робочої сили і часу. Ручні геодезичні вимірювання можуть бути неточними або непослідовними, що має негативний вплив на точність. Існують ризики безпеки для геодезистів, які працюють в небезпечних умовах або на важкодоступній місцевості. Обмеженою є можливість адаптації геодезичних робіт щодо змін чи неочікуваним умовим на будівельному майданчику. Високими є експлуатаційні витрати на робочу силу, обладнання і час.

Земляні роботи присутні практично на всіх етапах будівельного процесу, при їх виконанні виникає ряд труднощів які пов'язані із оцінкою кількісних і об'ємних характеристик переміщення земляних мас. Правильність розташування та коректний рівень заглиблення – це запорука правильної реалізації проектних рішень, тому контроль за виконанням цих робіт є важливим і обов'язковим. Геодезичне забезпечення при розробці котловану допоможе уникнути відхилень у геометрії та глибині котловану будь-якої складності та підрахувати обсяги земляних робіт.

Після закінчення земляних робіт проводять виконавче знімання, ціль якого – перевірити відповідність проекту положення, розмірів та глибини котловану, а також підрахувати об'єм вийнятого ґрунту [11]. Максимальне відхилення фактичних висот дна котловану від проектних значень не повинно перевищувати від 20-30 мм до  $\pm 50$  мм.

Виконавча зйомка котловану - це певний вид геодезичних послуг, який необхідний при будівництві будь-якої будівлі або споруди. Така зйомка дозволяє отримати необхідну інформацію про реальний стан дна котловану. При цьому

визначаються і наводяться всі висотні відхилення від відміток у проектній документації. Допускаються відхилення  $\pm 10$  см.

За отриманими даними складається відповідна документація, яка долучається до Акту виконаних робіт. Виконавча документація складається з різних матеріалів, які відіграють дуже велику роль при введенні об'єкта нерухомості в експлуатацію. Виконавча зйомка дозволяє переконатися в правильності розташування котловану, а відповідно і майбутньої будівлі або споруди. Роботи, пов'язані з переміщенням земляних мас, займають далеко не останнє місце в загальній вартості об'єкта будівництва, тому дотримання проектних розмірів є дуже важливою і відповідальною задачею, як і виконавча зйомка вертикального планування. [12]

Виконавчому зніманню при влаштуванні котлованів підлягають:

- а) кромки котлованів;
- б) траншеї;
- в) насипи та виїмки;
- г) межі планувальних робіт.

Виконавчому зніманню по висоті підлягають:

- а) контури котлованів;
- б) перепади позначок основ під фундаменти.

Виконавче геодезичне знімання котлованів повинно проводитися після зачищення укосів і дна котловану.

Періодичне виконавче знімання виконується з метою обчислення поточних об'ємів земляних мас.

За результатами знімання слід виконувати виконавчу схему котловану. На кресленні необхідно вказувати: відстань від контурів котловану (нижнього й верхнього) до основних осей споруди; позначки поверхні зовнішнього контуру до початку виймання ґрунту; виконавчі позначки й проектні позначки дна котловану.

## 1.2. Цифрова модель місцевості (об'єкта) інженерного призначення.

За класичним визначенням інженерна цифрова модель місцевості (ІЦММ) — сукупність інформації про положення в просторі та властивості об'єктів місцевості, зв'язках між ними в формі, придатній для опрацювання в системах автоматизованого проектування (САПР) та забезпечує вирішення інженерних завдань. ІЦММ має дві складові – ЦМР (цифрову модель рельєфу) та ЦМС (цифрову модель ситуації) [26]. За іншим визначенням ІЦММ є форма представлення інженерно-топографічного плану в цифровому об'єктно-просторовому виді для автоматизованого вирішення інженерних задач і проектування об'єктів.

Подання результатів інженерно-геодезичних вишукувань у вигляді ІЦММ інженерного призначення дозволяє оперативно та якісно створювати топографічні плани та інженерно-геологічні розрізи в заданому масштабі, здійснювати ведення чергового плану території з одночасним його оновленням та ін. Такі ІЦММ активно використовуються при автоматизованому створенні планів детального планування та різних об'єктів транспортної інфраструктури, при виконанні будівництва та виконавчих зйомок.

Важливою особливістю ІЦММ є можливість її генералізації, т. е. перетворення топографічного плану з масштабу відображення на інший. При цьому автоматично змінюються умовні знаки топографічних об'єктів, розміри та стилі підписів тощо, а їх метричні характеристики та координати окремих точок залишаються незмінними. При використанні ІЦММ поняття масштабу інженерно-топографічного плану стає кардинально іншим, оскільки модель створюється із заданими вимогами по точності і деталізації для великомасштабної топографічної зйомки (найчастіше масштабу 1:500), а подальше її перетворення з масштабу 1:500 у масштаби 1:1000 1:2000-1:5000-1:10000 шляхом генералізації виконується автоматично і не вимагає значних доопрацювань або створення заново. Подібною можливістю, як правило, мають

лише моделі місцевості, але не креслення топографічних планів, виконані у поширених графічних форматах.

В цифровому моделюванні топографічних поверхонь в середовищах геоінформаційних систем (ГІС) та систем автоматизованого проектування (САПР) розрізняють:

- Цифрова модель рельєфу (ЦМР, digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM; Digital Terrain Elevation Data, DTED) – цифрове подання рельєфу у вигляді множини тривимірних точок підстильної земної поверхні відкритих ділянок (bare ground), що уможлиблює побудову функції визначення висоти в будь-якій точці із заданою точністю і тим самим забезпечує вирішення інженерних завдань;

- Цифрова модель поверхні (ЦМП, DSM) – множина тривимірних моделей точок першої відбивної поверхні, виявлена датчиком, усіх штучних і природних об'єктів місцевості, яка може бути підстильною земною поверхнею відкритих ділянок (bare ground) або поверхнею будівель, споруд та рослинності;

- Модель висот об'єктів (canopy height model, CHM) – набір даних про відносні відмітки штучних (будівель, мостів тощо) та динамічних (рослинності, автомобілів тощо) перешкод.

Структури даних для зберігання та подання цих моделей - у вигляді хмари точок, растру або полігональної моделі на основі триангуляції (TIN).

З поширенням технологій інформаційного моделювання в галузі будівництва (BIM, Building Information Modelling) щодо поняття «Інженерна цифрова модель місцевості» стали застосовуватись такі її характеристики як геометрична точність, повнота та рівень деталізації (LOD). Згідно з концепцією BIM-проекту [7], кожен елемент BIM-моделі містить в собі відомості щодо трьох аспектів:

- Геометричні параметри елементів моделі: форма (точка, лінія, полігон), просторове розташування, габарити, діаметр, площа, об'єм, площа перетину, ухил, рівень та ін.);

- Графічне відображення – умови візуалізації із заданою детальністю геометричних параметрів моделі (зовнішній вигляд / вид, стиль, умовне позначення, колір, шрифт тощо);
- Атрибути елементів моделі, тобто даних що не мають просторового прив'язування і характеризують просторові об'єкти без зазначення їх місця розташування.

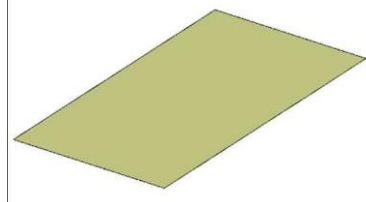
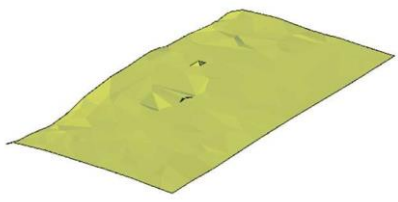
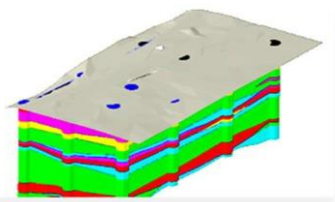
Кожна з перелічених моделей може бути створена і застосована в інформаційній системі на різних рівнях розроблення (LOD, Level of Development). LOD - це набір вимог, що визначає повноту пропрацювання елемента інформаційної моделі. LOD задає мінімально необхідний і достатній об'єм геометричної, просторової, кількісної а також атрибутивної інформації, призначеної для вирішення задач проекту (в нашому випадку – геодезичного забезпечення будівництва включно з цифровими моделями об'єктів та аналітичними діями для подання їхніх параметрів) на конкретній стадії життєвого циклу об'єкта будівництва.

В роботі [16] приведена структура цифрової моделі території під забудову, яка на думку автора відповідає вимогам інформаційного моделювання об'єктів будівництва (BIM-технології). В цій роботі, зокрема пропонуються формалізувати моделі рельєфу за трьома рівнями:

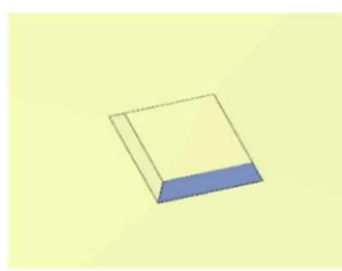
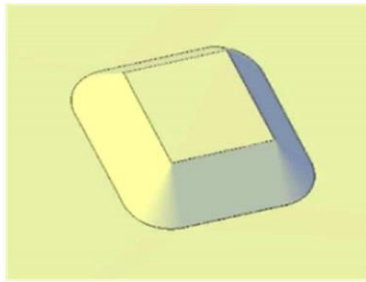
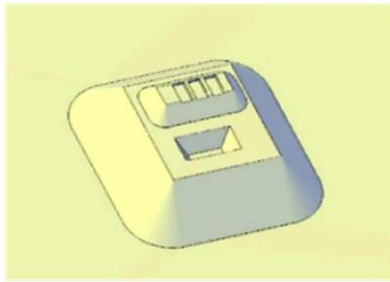
- для моделювання існуючого рельєфу;
- для моделювання проектного рельєфу з укосом;
- для моделювання виїмки ґрунту під фундаменти.

Таблиця 1.1 - Формалізація трирівневої моделі рельєфу в ІЦММ

**1: Існуючий рельєф**

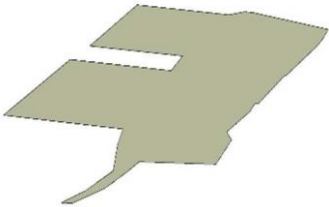
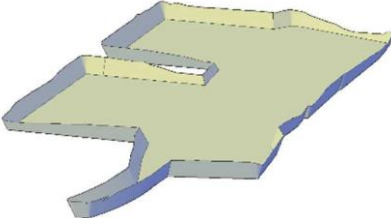
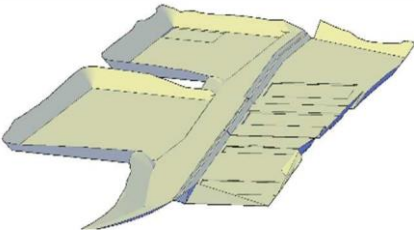
Перший рівень деталізації	Другий рівень деталізації	Третій рівень деталізації
		
<p>Опис:</p> <p>Відображається як горизонтальна чи похила площина з усередненими висотними відмітками території під забудову. Поверхня вимагає додаткового редагування</p>	<p>Опис:</p> <p>Відображається як 3D-поверхня, сформована за точками, структурними лініями, горизонталям тощо. Відображені всі складні елементи рельєфу. Поверхня не вимагає додаткового редагування.</p>	<p>Опис:</p> <p>Відображається набір 3D поверхонь. Представлені всі природні та штучні елементи рельєфу та геологічних поверхонь. Поверхні не вимагають додаткового редагування</p>
Тип об'єкта: 2D/3D-поверхня	Тип об'єкта: 3D-поверхня	Тип об'єкта: 3D-поверхні
Властивості:	Властивості:	Властивості:
Усереднена відмітка поверхні	Існуючі (чорні) відмітки поверхні	Геодезичні та геологічні відмітки поверхонь, об'єми між поверхнями
Застосування:	Застосування:	Застосування:
Стадія Передпроектна	Стадії Проект, Робоча документація	ПОБ, ППР Стадія Будівництво

**2: Проектний рельєф з укосом**

Перший рівень деталізації	Другий рівень деталізації	Третій рівень деталізації
		
<p>Опис:</p> <p>Територія під забудову представлена як 2D/3D площина з приблизними, усередненими відмітками виїмки</p>	<p>Опис:</p> <p>Проектний рельєф представлений як 3D –поверхня без складних елементів рельєфу, яка може пов'язуватись з існуючим рельєфом укосом або підпірною стінкою</p>	<p>Опис:</p> <p>Запроектована територія під забудову представлена як детальна 3D-поверхня зі складними елементами проектного рельєфу, має вихід на існуючий рельєф</p>

Тип об'єкта: 2D/3D-поверхня	Тип об'єкта: 3D-поверхня, структурні лінії укосу	Тип об'єкта: 3D-поверхні, структурні лінії укосів та підпірних стінок
Властивості: Усереднена відмітка проектного рельєфу, попередні об'єми земляних робіт	Властивості: Червоні відмітки проектного рельєфу, значення ухилів та об'ємів потребують уточнення	Властивості: Червоні відмітки проектного рельєфу, точні значення ухилів та об'ємів
Застосування: Стадія передпроекта	Застосування: Стадія Проект, Стадія Робоча документація	Застосування: ПОБ, ППР Стадія Будівництво

### 3: Виймка ґрунту під фундаменти

Перший рівень деталізації	Другий рівень деталізації	Третій рівень деталізації
		
Опис: Виймка без фундаментів. Представлена як 2D-поверхня (площина) з приблизними, з усередненими відмітками дна котловану	Опис: Виймка без фундаментів. Представлена як 3D-поверхня з виходом на існуючу поверхню, у вигляді вертикальних стін або довільних ухилів	Опис: Детальна 3D-виймка під фундаменти та коректними виходами на проектну поверхню. Фундаменти мають укоси у вигляді вертикальних стін
Тип об'єкта: 2D/3D-поверхня	Тип об'єкта: 3D-поверхні, структурні лінії укосів	Тип об'єкта: 3D-поверхні, структурні лінії укосів та фундаментів
Властивості: Усереднена відмітка виймки	Властивості: Відмітки виймки, укосів, приблизні об'єми укосів ґрунту	Властивості: Відмітки виймки, укосів, точні об'єми укосів та котловану
Застосування: Стадія передпроекта	Застосування: Стадія Проект Стадія Робоча документація	Застосування: ПОБ, ППР Стадія Будівництво



### 1.3. Застосування БПЛА для інженерно-геодезичних вишукувань.

В наш час, оперативне отримання аерофотознімків високої якості стало можливим завдяки використанню безпілотних літальних апаратів, які значно спростили процес аерофотознімання та дали можливість зйомки навіть незначних за площею територій або окремих об'єктів. Використання безпілотних літальних систем дозволяє:

- Вирішувати топографічні та інженерно-геодезичні завдання;
- Будувати тривимірні моделі місцевості;
- Виконувати дистанційну діагностику інженерних споруд;
- Здійснювати тепловізорну зйомку.

Пролітаючи по заданому маршруту можна отримати точні і достовірні фото та відеоматеріали про особливості рельєфу, контурів ситуації, стану природних ресурсів місцевості, котра потребує дослідження.

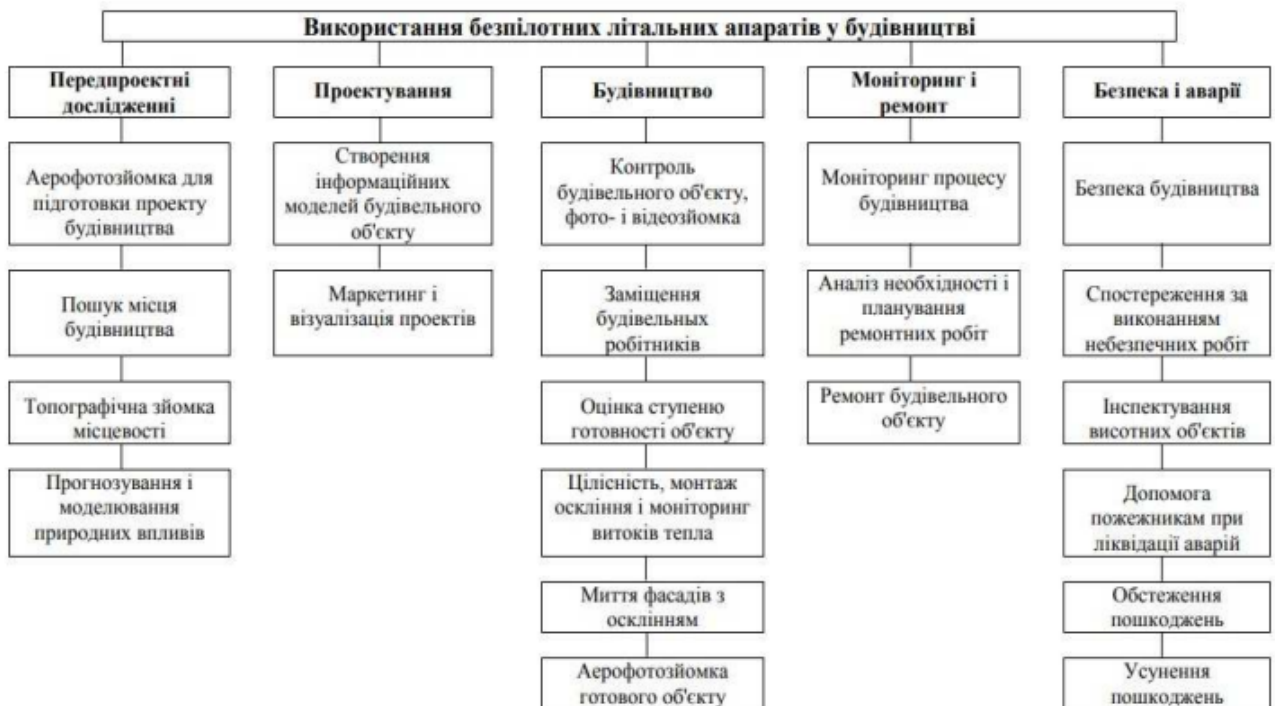


Рис. 1.1. Використання БПЛА у будівництві

Переваги виконання геодезичного супроводу земляних робіт з допомогою дронів:

- технологія дронів скорочує витрати праці та часу, прискорюючи терміни виконання проектів;
- дрони надають точні, узгоджені дані, підвищуючи загальну точність та надійність інженерно-геодезичних робіт;
- дрони можуть переміщатися в небезпечних умовах і на важко прохідній місцевості, знижуючи ризик небезпеки для людей;
- дрони забезпечують більшу гнучкість технології та графіку робіт, легко адаптуючись до змін чи несподіваних умов на місці;
- дрони значно скорочують експлуатаційні витрати за рахунок скорочення потреби в робочій силі та часі, що витрачається на об'єкт.

Важливим етапом виконання цифрового аерознімання є розроблення технічного проекту в якому передбачена планово-висотна прив'язка аерознімків інших матеріалів аерознімання, обробка даних навігаційної та інерційної систем.. Первинна обробка та врівноваження траєкторії знімання виконується в спеціалізованому програмному забезпеченні. Середні квадратичні похибки не повинні перевищувати величин, наведених у таблиці 1.2. [24].

Таблиця 1.2. - Середні квадратичні похибки фотограмметричного проекту

Масштаб знімання	Точність кутів орієнтування (градуси°)	Точність визначення координат та висот центрів траєкторії (СКП) (м)	
		Планове положення	Висотне положення
1:10000	0,150°	<0,30	<0,07
1:5000	0,100°	<0,20	<0,25
1:2000	0,010°	<0,10	<0,15
1:1000	0,005°	<0,08	<0,12

1:500	0001°	<0,05	<0,1
-------	-------	-------	------

Для забезпечення необхідного масштабу знімання залежно від характеристик об'єкту аерознімання повинне виконуватись з геометричним розрізненням аерофотознімків наведеними в Таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. - Масштаби аерознімань при створенні ІЦММ

Масштаб знімання	Храктеристика об'єкта	Максимальний розмір пікселя аерознімка на місцевості (GSD, м)
1:1000	Забудовані території міст і селищ. Забудовані території населених пунктів, незабудовані території, сільськогосподарські угіддя	<0,07
1:500	Забудовані території населених пунктів, незабудовані території, сільськогосподарські угіддя	<0,03

Фокусна відстань об'єктиву неметричної аерофотокамери повинна бути підібрана таким чином, щоб перепад висот на місцевості (в тому числі з урахуванням висоти будівель) в межах одного об'єкту аерознімання не перевищував 7% від висоти аерофотозйомки. Тобто повинна виконуватись наступна вимога:

$$\Delta h / H \leq 0,07, \quad (1.1)$$

де  $\Delta h$  - перепад висот на місцевості (в тому числі з урахуванням висоти будівель);  
H – висота аерознімання.

Мінімальне поздовжнє перекриття аерофотознімків при використанні неметричних камер (для використання алгоритмів самокалібрування

неметричних камер) має становити не менше 75%, поперечне - не менше 60%. В окремих випадках перекриття має бути збільшене для забезпечення мінімально необхідного перекриття в на найвищих ділянках місцевості.

Параметри аерознімання та технічні характеристики аерофотознімального обладнання, які використовуються для розрахунків під час розробки технічного проекту аерофотознімальних робіт:

(Nx) кількість пікселів матриці впоперек напрямку аерофотозйомочного маршруту (зазначається в документі, що підтверджує виконання лабораторного калібрування);

(Ny) кількість пікселів матриці вздовж напрямку аерофотозйомочного маршруту (для аерофотокамер кадрового типу, зазначається в документі, що підтверджує виконання лабораторного калібрування);

(p) фізичний розмір пікселя матриці (зазначається в документі, що підтверджує виконання лабораторного калібрування);

(f) фокусна відстань об'єктиву (зазначається в документі, що підтверджує виконання лабораторного калібрування);

(P) роздільна здатність аерофотознімка на місцевості (зазначається в технічному завданні);

(H) висота виконання аеронімальних робіт;

(m) знаменник масштабу аерознімання;

(lx) фізичний розмір матриці фотокамери впоперек напрямку аерофотознімального маршруту;

(ly) фізичний розмір матриці фотокамери вздовж напрямку аерофотознімального маршруту (для аерофотокамер кадрового типу);

(Lx) довжина покриття аерознімка на місцевості впоперек напрямку аерознімального маршруту;

(Ly) довжина покриття аерознімка на місцевості вздовж напрямку аерофотозйомочного маршруту (для аерокамер кадрового типу).

Фізичний розмір матриці вздовж та впоперек напрямку аерофотозйомочного маршруту:  $lx = Nx \times p$ ;  $ly = Ny \times p$

Знаменник масштабу аерознімання:  $m = H/F$

Роздільна здатність аерознімка на місцевості:  $P = m \times p$

Довжина покриття аерофотознімка на місцевості вздовж та впоперек напрямку аерознімального маршруту:

$$Lx = P \times Nx; Ly = P \times Ny$$

Висота аерофотознімання:  $H = \frac{P \times F}{p}$

У вхідних даних технічного проекту зазначають: межі та площу об'єкту знімання; проектоване розрізнення аерознімків; поперечне та повздовжнє перекриття аерознімків; формат, колірний діапазон та радіометричне розрізнення отримуваних аерознімків.

Розрахункова частина технічного проекту подає відомості: кількість аерофотознімальних маршрутів та загальна кількість знімків; протяжність маршрутів; загальні витрати польотного часу в годинах; витрати аерознімального часу; істинна висота виконання аерофотозйомки; відношення базису знімання до висоти знімання  $b/H$ .

Етапи робіт при виконанні фотограмметричного проекту:

- Підготовчі роботи: узгодження меж картографування, планування політної місії, планування мережі опорних точок та їх геодезична зйомка
- Створення наземної мережі опорних точок;
- Аерознімання;
- Обробка результатів зйомки;
- Векторизація та камеральне дешифрування
- Польове дешифрування
- Створення цифрової моделі місцевості і при потребі - цифрового топографічного плану.

- Далі виконується фотозйомка. Після цього проводимо обробку відзнятих матеріалів: зшивка та ортотрансформування. На виході отримуємо ЦМР та ортофотоплан.

В фотограмметричних програмних комплексах реалізовано поєднання алгоритмів класичної фотограмметрії та сучасного підходу до автоматичного фотограмметричного опрацювання знімків, який передбачає такі основні етапи:

- Пошук характерних (інша назва - особливих) точок на знімках;
- Пошук та формування стереопар;
- Зіставлення характерних точок на знімках стереопар та створення зв'язкових точок;
- Урівнювання (обчислення елементів зовнішнього та внутрішнього орієнтування знімків методом фототріангуляції);
- Розрахунок карт глибини;
- Формування щільної хмари точок;
- Створення цифрових моделей видимої поверхні та моделі рельєфу;
- Ортокорекція фотознімків та формування ортофотоплану.

Для кожного етапу доступні параметри розрахунку, що дозволяють повністю контролювати процес. У процесі розрахунку вся інформація виводиться у докладний протокол, який може бути збережений та використаний для аналізу.

Для задач нашого дослідження важливим є перетворення хмари 2D точок в цифрову модель рельєфу (ЦМР).

Програмне забезпечення дозволяє створювати цифрову модель рельєфу (ЦМР) в напіваавтоматичному режимі. Для цього необхідно виконати кілька дій:

1. Виконати фільтрацію шумів – помилкових точок з відмітками нижче за реальний рельєф.
2. Виконати класифікацію рельєфу. У програмах реалізовано декілька методів класифікації, які підходять для різних хмар точок та типів

місцевості. Можлива як класифікація (віднесення рельєфних точок до шару «Рельєф»), так і створення нової хмари з рельєфними точками. Для фотограмметричних хмар точок є можливість видалення нерельєфних об'єктів, що погано піддаються автоматичній класифікації в інтерактивному режимі шляхом вказівки опорного контуру по рельєфу по периметру об'єкта. При необхідності тонкої фільтрації твердих поверхонь (наприклад, проїжджої частини) можна виконати додаткову фільтрацію рельєфу на таких ділянках пороговим фільтром за коефіцієнтом нерельєфності з переглядом результату. Артефакти, що залишилися після автоматичної класифікації, не відносяться до рельєфу, можуть бути усунені вручну (видаленням окремих точок і груп точок). Також можна розрахувати нормалі та виконати фільтрацію за значенням ухилу, усуваючи некоректно класифіковані вертикальні об'єкти по краях хмари або у складних міських умовах.

3. Працюючи з моделлю рельєфу, можна створити матрицю висот по рельєфній хмарі точок (за шаром «Рельєф» хмари точок), при необхідності її інтерполювати. Матриці висот можна використовувати як ефективну модель рельєфу або для оцінки якості виділеного рельєфу і виконання інженерних розрахунків.
4. Провести проріджування отриманої хмари точок залежно від вимог до цифрової моделі рельєфу (максимальна відстань між точками на плоских ділянках, мінімальний розмір мікроформ рельєфу, що відображається). В результаті буде створено хмару, що містить кількість точок, що можна порівняти з числом пікетів при інструментальній топографічній зйомці.
5. За прорідеженими (каркасними, або структурними) точкам хмари будують поверхню, яку можна доповнити горизонталями, пікетами, підписами тощо.

Суттєвим для точності моделювання є дотримання структурного опису поверхні. Програмні засоби дозволяють в автоматизованому режимі виконувати

як виявлення структурних точок в поверхні так і виконувати векторизацію структурних ліній. В кар'єрах і котлованах структурними лініями є уступи кар'єрів. В програмі реалізована методика автоматизованого пошуку ліній зламу рельєфу із створенням векторних структурних ліній на них (рис. 1.2).

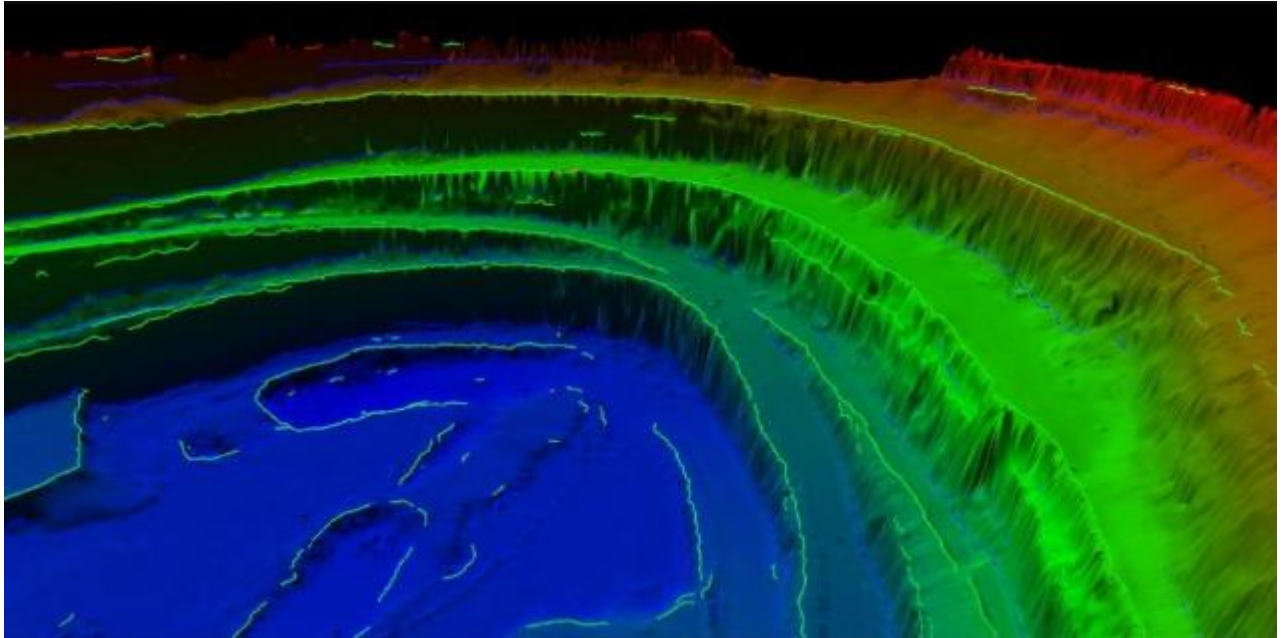


Рис. 1.2. Розпізнавання країв уступів кар'єра

Фінальний етап виділення країв дозволяє інтерактивно керувати параметрами і бачити в режимі попереднього перегляду результат, що отримується на основі поточного значення параметрів.

При необхідності отримані краї можна відфільтрувати по довжині, видаливши несуттєві елементи та шуми, а також виконати автоматичне зшивання однотипних елементів.



## **Розділ 2. Технології геодезичного забезпечення аерознімання з безпілотних літальних апаратів.**

### **2.1. Забезпечення фотограмметричних проектів опорною геодезичною інформацією.**

Принципово задача забезпечення фотограмметричних проектів опорною геодезичною інформацією вирішується двома шляхами [20]:

Перший шлях – безпосередньо під час знімання виконується пряме позиціонування камери та вимірювання напрямків орієнтування оптичної осі камер в геодезичному просторі з допомогою GPS/INS апаратури;

Другий шлях – аналітичне вирішення задачі з допомогою набору опорної інформації (найчастіше такою інформацією є набір опорних точок, геодезичне положення яких відоме з достатньою точністю і які надійно зчитуються на аерознімках фотограмметричного блоку).

В геодезії і картографії безпілотні рішення мають власну специфіку, а операторам і фахівцям слід враховувати ряд факторів, щоб обрати оптимальне рішення для виконання конкретних завдань. Залежно від вимог щодо точності просторового моделювання а також часових обмежень користувачі можуть покладатись на мережу наземних опорних і контрольних точок або на застосування безпілотників з обладнанням геодезичного класу точності для супутникового визначення місцеположень. Часто в одному проекті обидва підходи поєднуються.

Ведуться також дослідження щодо пошуку рішень з комбінуванням апаратної частини технологією супутникового позиціонування, опорних аерознімків, відео одометрії [2]. Для обмежених в просторі локацій якими є будівельні майданчики, котловани, кар'єри існують рішення із застосуванням в якості опорної інформації замість координат - геодезичні лінійні виміри та виміри перевищень [3].

## 2.2. Позичювання центрів проекцій аерознімків за технологіями RTK, PPK, Cloud PPK.

Сучасні виробники геодезичних дронів інтегрують технології аерознімання і ГНСС, з підвищенням точності позиціонування дронів в момент фотографування. Основою такого підходу є технологія «Кінематика в реальному часі (RTK)».

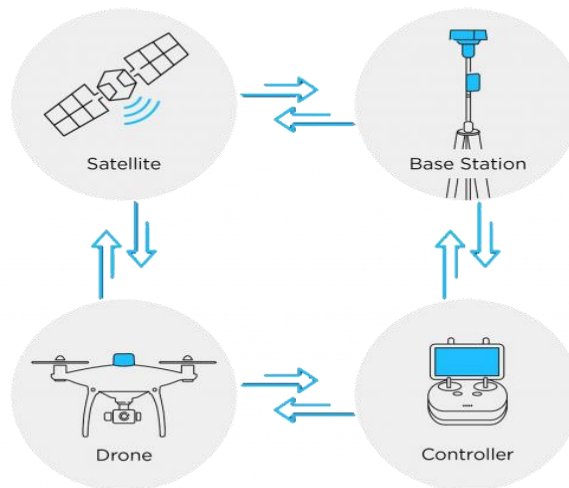


Рис.2.1. Схема застосування технології RTK сумісно з дронами. В цій схемі: Satellite – супутник, Base Station – базова станція, Drone – квадрокоптер, Controller – пульт дистанційного керування.

Кінематика в реальному часі (RTK) є вдосконаленою технологією супутникового позиціонування, яка передбачає застосування наземної базової ГНСС - станції з відомим місцеположенням в якості допоміжної точки відліку положення, щоб надати більш точні дані. Коли система RTK встановлена на дроні, вона застосовується для поєднання і співставлення даних про місцеположення, отримуваних з віртуальних і фізичних базових станцій, а також здійснює коригування місцеположення камери дрона в режимі реального часу. При правильному застосуванні безпілотники можуть створювати точні дані про місцезнаходження на сантиметровому рівні точності, які в польоті вбудовуються в файли аерознімків.

Безпілотні рішення RTK особливо ефективні, оскільки вони забезпечують результати геоприв'язування знімків в режимі реального часу. Проте для якісної

роботи обладнання необхідний постійний стійкий зв'язок протягом усього аерознімального польоту, який інколи складно забезпечити в умовах недостатньо розвинутої мережі наземних перманентних станцій ГНСС, щільної забудови і у гірських місцевостях.

У польоті RTK потрібно застосовувати два типи каналів передачі даних: один між пультом дистанційного керування та базовою станцією RTK, а інший між пультом дистанційного керування та дроном. Лінія зв'язку між пультом може бути нестабільною під час мережевого підключення, у той час як зв'язок між пультом керування та безпілотником може залежати від перешкод та перешкод у районі польотів. Тому, щоб знизити ризик втрати зв'язку на каналах передачі даних, гарною альтернативою геодезичних досліджень може стати технологія PPK, особливо планується виконувати роботи у віддалених районах з поганою якістю зв'язку в мережі або при наявності таких перешкод, як дерева, будівлі чи металічні конструкції.

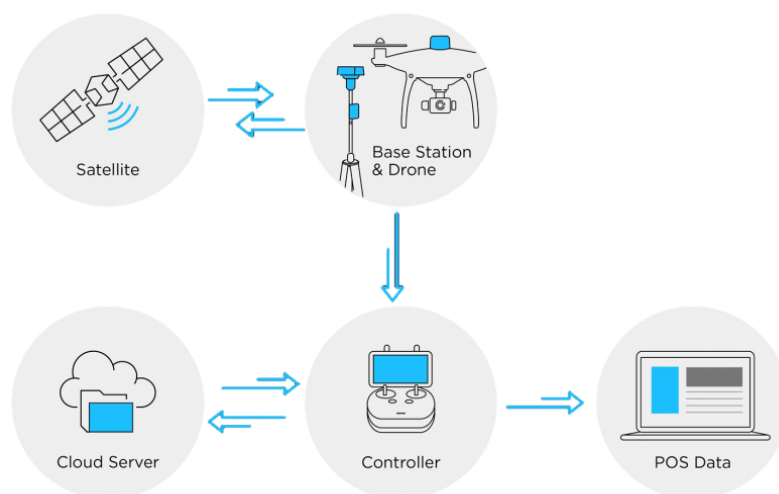


Рис.2. 2. Схема застосування технології PPK включно з технологією на основі хмарного сервісу. В цій схемі: Satellite – супутник, Base Station&Drone – базова станція і квадрокоптер з обладнанням RTK, Cloud Server – хмарний інтернет-сервер, Controller – пульт дистанційного управління, POS data – дані POS.

Технологія PPK дозволяє відкоригувати дані не під час польоту, а після його завершення. Самі зареєстровані дані місцеположень зберігаються на борту

безпілотного літального апарату. Після завершення польоту спеціалісти поєднують ці дані з даними базової станції, з допомогою спеціального програмного забезпечення, встановленого на ЕОМ. Це дає користувачам більше гнучкості і надійності: наприклад, якщо в польоті виникають проблеми на лінії передачі даних в реальному часі, точність результатів все одно можна підтримувати, так як розрахунки містять дані РРК.

Хмарний сервіс РРК (Cloud РРК) для таких дронів, як DJI Phantom 4 RTK виводить ефективність на новий рівень за рахунок того, що обчислювальні операції виконуються безпосередньо в пульті дистанційного керування. Це стало можливим після появи додаткової опції програм планування польотів, таких як наприклад DJI GS RTK. Таке рішення дозволяє відмовитися від використання окремої програми на стаціонарному комп'ютері або ноутбуку.

Дані, зібрані з будь-якої базової станції DJI базової станції RINEX, можна швидко обробити у додатку, що оптимізує робочі процеси без шкоди для точності даних. Отримані позиційні дані можуть бути легко імпортовані в фотограмметричне програмне забезпечення для подальшого опрацювання.

Таблиця 2.1 - Відмінності між технологіями RTK, РРК і хмарним РРК

	<b>Дрон + RTK</b>	<b>Дрон + RTK + РРК</b>	<b>Дрон + RTK + Cloud РРК</b>
Точність позиціювання	Сантиметрового рівня	Сантиметрового рівня	Сантиметрового рівня
Вимагається підключення до даних в реальному часі	Так	Ні	Ні

Коли і де виконуються розрахунки	В реальному часі під час польоту дрона	Після польоту в програмному забезпеченні РРК	Після польоту в програмному забезпеченні GS RTK на сумісному пульті керування
Вплив втрати RTK Lock	Високий. Якість підключення залежить від інтернету або підключення до даних на місці.	Низький	Низький
Вимагається базова станція RTK	Так. Вимагається підключення до базової станції або мережевої RTK, як клієнт CORS	Так. Вимагається підключення до базової станції або мережевої RTK, як клієнт CORS	Так. Вимагається підключення до базової станції або мережевої RTK, як клієнт CORS

Таблиця 2.1 наочно показує, що всі безпілотні рішення RTK та РРК здатні надавати просторові координати центрів проекції знімків із сантиметровим рівнем точності. Але рішення RTK вимагають наявності базової ГНСС - станції та особливих умов для виконання польоту, щоб можна було опрацьовувати дані в режимі реального часу. У той же час, рішення на основі РРК пропонують більш гнучкі умови з постобробкою.

### 2.3. Планування наземної опорної мережі розпізнавальних знаків

Для надійної прив'язки аерофотознімків обов'язковою є планово-висотна підготовка аерофотозйомки. Підготовка виконується відповідно до положень

інструкцій з виконання топографічних знімачь, при цьому рекомендації щодо вибору та маркування опознаків доповнюються у зв'язку з особливостями виконання аерофотознімальних робіт з використанням БПЛА.

Як опознаки рекомендується використовувати: пункти державної геодезичної мережі, геодезичних мереж згущення, об'єкти, що мають тверді контури на місцевості, контрастні з навколишнім фоном і добре помітні на аерофотознімках об'єкти. Рекомендується проводити надійне маркування розпізнавальних знаків. При необхідності розпізнання такі знаки наносять фарбою на дорожнє покриття або розміщують на поверхні землі спеціально виготовлені щити-мішені. Форма опознаку повинна забезпечувати безпомилкове визначення його центру, у зв'язку з чим рекомендується використовувати розпізнавальні знаки типу «мішень», напівхрест або хрест.

Приклади розміщення опорних точок (опознаків) приведені на рисунках нижче.

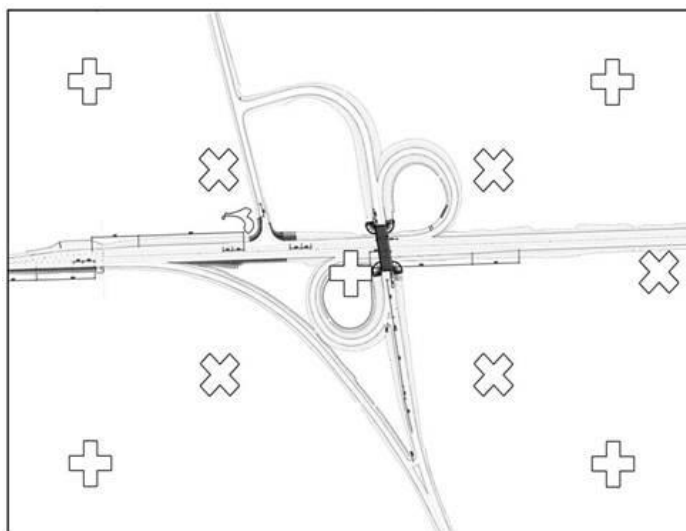
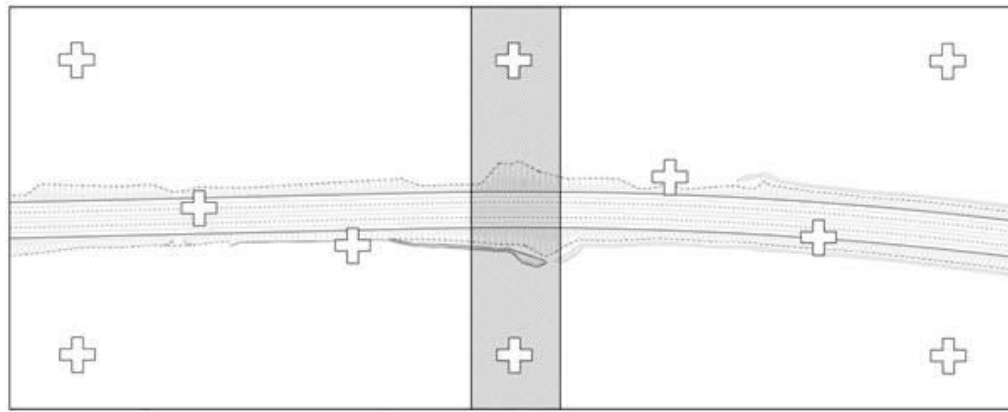


Рис.2.3. Типова схема розміщення опознаків «конверт»



■ - Зона перекриття суміжних польотних завдань

⊕ - Оповзнаки

Рис. 2.4. Схема розміщення опознаків при перекритті польотних завдань

При визначенні кількості та розташування розпізнавальних знаків рекомендується:

- на ділянках площею 1 кв. км і менше опознаки розташовуються за схемою «конверт», що передбачає встановлення не менше 5 знаків; при цьому 4 опознаки встановлюються в кутових зонах і один в центральній зоні. Кількість опознаків рекомендується збільшувати при необхідності з рівномірним розподілом всередині площі знімання;

- при зніманні лінійно-протяжного об'єкта: по 2 опознаки на початку та в кінці ділянки зйомки і не рідше ніж через кожні 500 м вздовж осі траси;

- при проектуванні кількох польотних завдань із запланованими зонами перекриття необхідно встановити не менше 2-х опознаків у зоні перекриття. При ширині перекриття польотних завдань понад 1 км рекомендується встановлювати розпізнавальні знаки не рідше ніж через 250 м;

- на ділянках з різницею висот понад 20 м, рекомендується встановлювати додаткові опознаки у характерних переломних точках рельєфу;

- кількість опознаків може збільшуватися залежно від складності забудови та рельєфу.

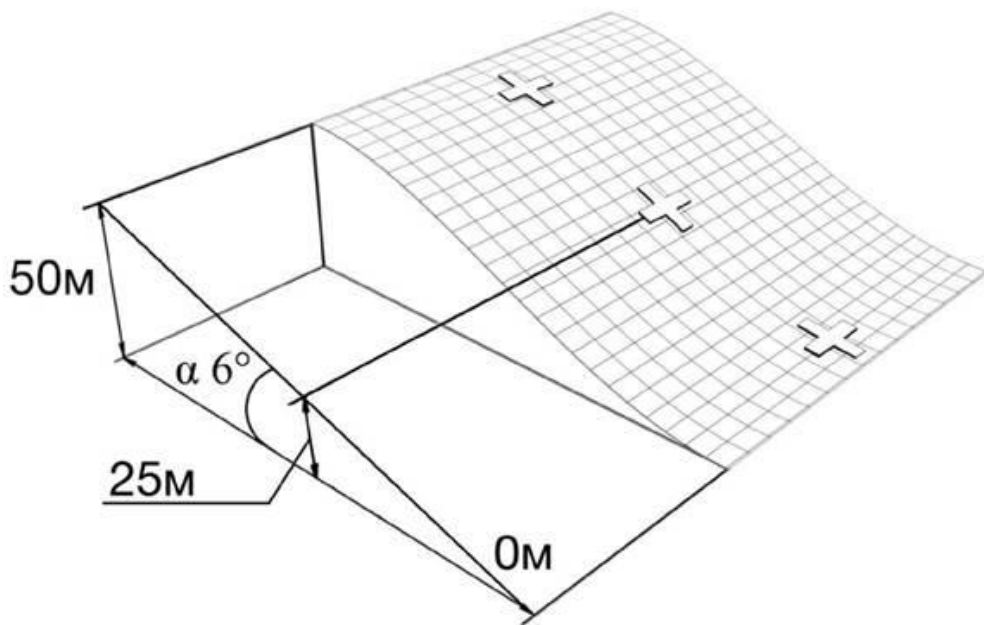


Рис.2.5. Схема розміщення опознаків в місцях різкого перепаду висот

Для фотограмметрії з дронів зазвичай використовується набагато щільніше розміщення опорних точок (GCP – Ground Control Points), але оптимальна кількість та розміщення опорних точок все іще обговорюються в літературі. Деякі вчені припустили, що достатньо близько 10–20 опорних точок на квадратний кілометр досліджуваної території, але інші дослідники виявили, що оптимальна кількість та розміщення варіюватимуться залежно від цілей дослідження та рельєфу місцевості. Як мінімум, опорні точки повинні бути розміщені так, щоб мінімальна обмежувальна геометрія, утворена опорними точками, охоплювала всю територію, що вивчається. Також важливо ретельно видаляти будь-які викиди (наприклад, опорні точки з потенційно помилковими вимірами розташування), щоб вони не впливали на точність похідних моделей.

Планово-висотні опознаки встановлюються згідно із схемою, розробленою на стадії проектування польотного завдання.

Основними об'єктами для вибору опорних точок без необхідності їхнього маркування є: кути фундаментів, бетонні блоки; об'єкти дорожньої інфраструктури (краї мостів, огорожі, люки, зливні решітки, автопавільйони, дорожні знаки, бордюри, та ін.); опори стовпів ліній електропередач та зв'язку;



кути парканів та огорож; інші об'єкти, які мають чіткі контури на місцевості, які є різними за кольоровою гамою по відношенню до місцевості.

Закладені пункти при необхідності маркуються для чіткого розпізнавання на знімках перед аерозніманням з мінімальним розривом в часі з початком польотів. Тимчасове закріплення опознаків виконується контрастними до підстильної поверхні водостійкими матеріалами (матерія, пластикові предмети) або фарбою на жорстких поверхнях (бетонні плити, асфальтоване покриття).



Рис.2.6. Штучне маркування місцевості перед аерозніманням

Забороняється використовувати контури з нечіткими краями, та поблизу силових ліній електропередач, радіолокаційних випромінювачів, дерев та високих об'єктів, які перешкоджають супутниковому сигналу або спотворюють його.

У відповідності з інструкціями з виконання маркшейдерських робіт, помилки визначення положення опорних і знімальних точок для масштабу 1:500 не повинні перевищувати 0,1 і 0,4 мм в масштабі плану, що складає на місцевості – 5 та 20 см відповідно. Середні помилки визначення висоти опознаків і контрольних точок не повинні перевищувати 1/10 і 1/3 від висоти перетину рельєфу горизонталями 0,5 м. При цьому допустимі відхилення на контрольних точках, набраних на бровках уступів і положення бровок, встановлених по плану виїмки ґрунту, повинні складати не більше як 1 мм в масштабі плану і 0,4 м по висоті.

Основним методом створення наземної опорної мережі точок для потреб аерознімання є зйомка методами Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Це процес виконання супутникових ГНСС-спостережень на точках місцевості (в даному випадку – на будівельному майданчику) з подальшим обробленням результатів спостережень та обчисленням координат і висот точок відносно відомих пунктів геодезичних мереж чи постійно діючих станцій.

В процесі ГНСС-вимірювань координат наземних опорних точок виконується фотофіксація встановленого ГНСС приймача на контурі місцевості або маркері (фотоабрис) з відображенням місця центрування та найближчих орієнтирів на місцевості.

Вхідними пунктами ГНСС-спостережень є пункти державної геодезичної мережі та пункти знімальних мереж. Контроль координат виконується кожною щонайменше на трьох пунктах Державної геодезичної мережі. Розбіжність у значеннях координат та висот контрольних вимірів при ГНСС-спостереженні та вихідними координатами і висотами пунктів з Банку геодезичних даних наведена в таблиці 4.6.

Таблиця 2.2 - Контрольні розходження у значеннях координат та висот між контрольними вимірами контрольних полігонів та вихідними координатами і висотами пунктів Державної геодезичної мережі (м)

Масштаб зйомки	Максимальна розмір пікселя аерознімання (GSD) (м)	Розбіжність у значеннях координат та висот між контрольними вимірами та вхідними координатами і висотами пунктів ДГМ (м)	
		Планове положення	Висотне положення
1:10000	≤0.80	≤0.25	≤0.50
1:5000	≤0.40	≤0.25	≤0.50
1:2000	≤0.20	≤0.15	≤0.25
1:1000	≤0.15	≤0.10	≤0.15
1:500	≤0.07	≤0.05	≤0.10

Як новітня розробка на ринку геодезичного обладнання позиціонують пристрої нового типу - Смарт наземні контрольні точки з підтримкою функції базової ГНСС- станції. Прикладом такого пристрою є AeroPoints2 від компанії Propeller, США [6].



Рис.2.7. AeroPoints. Смарт – наземна контрольна точка з підтримкою функції базової ГНСС- станції.

Розкладіть їх, натисніть кнопку, і вони автоматично почнуть записувати свою позицію. AeroPoints служать базовою станцією для автоматичних коригувань координат центрів проєкцій аерознімків підключеного до неї дрона з підтримкою повного робочого процесу РПК. Дані GPS зі станції можна отримати з файлами CSV або автоматично завантажувати з поля за допомогою вбудованого підключення WiFi.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики пристрою AeroPoints

*Розмір: 506 x 506 x 26 мм*

*Вага: 1,5 кг*

*Робочий температурний діапазон: -10 – +50 °C*

*Сертифікати: FCC, IC, CE, RCM*

*ГНСС: L1/L2 GPS + ГЛОНАСС + Galileo + Beidou*

*Мінімальний час підготовки до режиму РПК: 2 хвилини*

*Максимальна базова відстань: 40 км*

Час виправлення в режимі РРК: 2 хвилини

WiFi: 802.11 b/g/n

Акумулятор: 16 Вт·год LiFePO<sub>4</sub>

Зарядка: 3 Вт сонячної енергії + 12–36 В постійного струму

Час заряджання (сонячна панель – повне сонце): 8 годин

Час зарядки (зарядний пристрій від електромережі): 3 години

Термін служби батареї: 100 годин реєстрації

Точність по горизонталі: 10 мм + 1 ppm (ppm - віддалення дрона від базової станції в км)

Точність вертикальна: 20 мм + 1 ppm

Час корекції координат: 10 хвилин

Максимальний час роботи: 8 годин

Об'єм пристрою для зберігання даних: 256 МБ твердотільної флеш-пам'яті розраховано на 100 годин роботи з виправленням помилок.

При фотограмметричному опрацюванні цифрових аерознімків прогнозоване найбільше значення помилки цифрової моделі рельєфу в плані не перевищує половини від розміру пікселя на місцевості  $GSD$ , помноженого на  $\sqrt{2}$ :

$$E_{xy} = \sqrt{2} \cdot (0.5 \cdot GSD) . \quad (2.1)$$

Очікувана помилка цифрової моделі рельєфу по висоті визначається з формули розрахунку висотної відмітки:

$$\Delta h = \frac{\Delta p \cdot H}{B} . \quad (2.2)$$

де  $\Delta p$  – різниця повздовжніх паралаксів знімків стереопари,  $H$  – висота аерознімання,  $B$  – базис фотографування.

$$E_z = \sqrt{\left(\frac{\Delta p \cdot H}{B^2} \cdot m_b\right)^2 + \left(\frac{H}{B} \cdot m_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{B} \cdot m_H\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{h}{B} \cdot m_b\right)^2 + \left(\frac{H}{B} \cdot m_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{h}{H} \cdot m_H\right)^2} \quad (2.3)$$

де  $m_b$ ,  $m_{dp}$ ,  $m_H$  – відповідно середні квадратичні помилки визначення довжини базису знімання, різниць повздовжніх паралаксів і висоти аерознімання.

Таким чином, головним параметром при проектуванні польотного завдання на аерознімання є обґрунтований вибір висоти фотографування, при

якій забезпечуватиметься потрібна точність плану і охоплюється вся місцевість фотографування.

При точності, заданій інструкціями та технічним завданням на створення інженерної цифрової моделі місцевості, виконуємо розрахунок відстаней  $L$  між опознаками для досягнення точності фотограмметричної мережі в плані та по висоті за формулами

$$L_{XY} = \frac{b_{XY}bH}{f}, \quad L_Z = \frac{b_ZbH}{f}. \quad (2.4)$$

Для розрахунку кількості опорних точок використовують формули, які виражають, через яку кількість базисів знімків слід розміщувати планову або висотну опорні точки. Розрахунок  $n_{XY}$  та  $n_Z$  виконують із заокругленням до найближчого більшого цілого числа:

$$n_{XY} = \sqrt[3]{\left(\frac{fm_{XY}}{0.2Hm_{xy}}\right)^2}, \quad n_Z = \sqrt[3]{\left(\frac{fm_Z}{0.14Hm_p}\right)^2}. \quad (2.5)$$

де  $m_{XY}$ ,  $m_Z$  задаються технічним завданням,  $m_{xy}$  та  $m_p$  - точність вимірювання координат і паралаксу на знімку, яка складає розмір одного пікселя.

У разі, коли невідомі точні координати центрів проєкцій аерознімків, вимоги до планово-висотної основи стандартні: одна планово- висотна точка на 6-10 базисів знімання. Кількість пунктів, необхідних для створення планово-висотної основи не менше чотирьох в плані, і п'яти по висоті.

#### **2.4. Фотограмметрична модель та її зовнішнє орієнтування.**

Фотограмметрична модель об'єкта – це сукупність координат точок об'єкта фотограмметричного знімання, визначених в результаті фотограмметричного опрацювання фотограмметричних знімків. Фотограмметрична модель об'єкта подібна самому об'єкту, може мати довільний масштаб і бути довільно розміщена і орієнтована відносно системи координат об'єкта. Орієнована фотограмметрична модель об'єкта – це

фотограмметрична модель об'єкта, координати точок якої визначені в системі координат об'єкта фотограмметричного знімання.

Геометрична модель об'єкта, побудована в результаті виконання взаємного орієнтування аерознімків, має довільний масштаб і довільну просторову орієнтацію. Тому в задачу зовнішнього орієнтування моделі входить перетворення координат точок з модельної системи координат  $S_L X_M Y_M Z_M$  (рис. 2.8) в систему координат  $OXYZ$  об'єкта з врахуванням масштабу моделі.

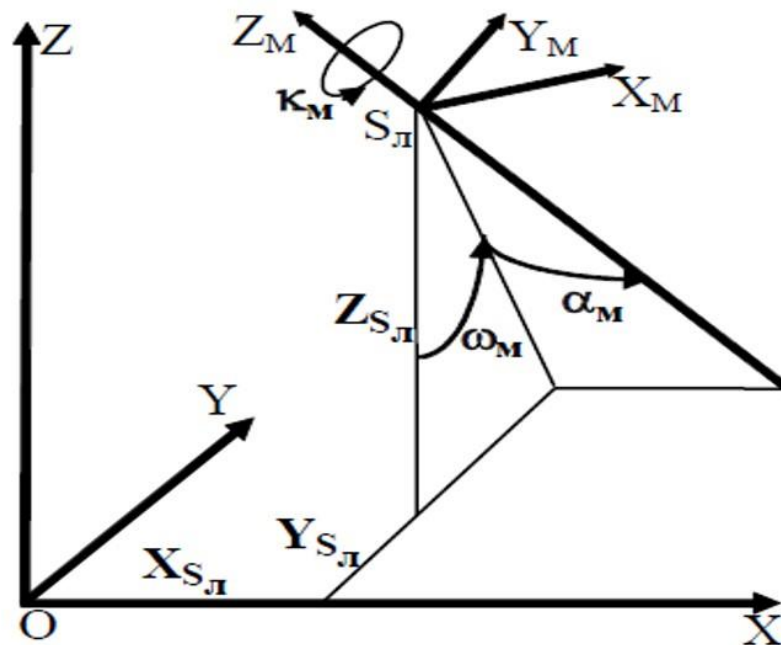


Рис.2.8. Орієнтування фотограмметричної моделі в геодезичному просторі

Для виконання цих перетворень застосовують рівняння зовнішнього орієнтування моделі:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}_L + A_{\omega_M \alpha_M \kappa_M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_M t_M, \quad (2.6)$$

де  $X_{S_L}$ ,  $Y_{S_L}$ ,  $Z_{S_L}$  - координати лівого центра проєкції  $S_L$  в системі координат  $OXYZ$  об'єкта;

$\omega_M, a_M, \kappa_M$  - кути повороту системи координат  $S_{л}X_M Y_M Z_M$  моделі відносно системи координат  $OXYZ$  об'єкта і  $t_M$  - масштабний коефіцієнт є елементами зовнішнього орієнтування моделі.

При наявності на моделі відображення опорних точок початок системи координат моделі можна перенести в одну з цих точок, наприклад під номером один. В результаті рівняння (2.6) набудуть вигляду:

$$\begin{bmatrix} X - X_1 \\ Y - Y_1 \\ Z - Z_1 \end{bmatrix} = A_{\omega_M a_M \kappa_M} \begin{bmatrix} X_1 - X_1 \\ Y_1 - Y_1 \\ Z_1 - Z_1 \end{bmatrix}_M t_M, \quad (2.7)$$

де  $X_1, Y_1, Z_1$  - координати опорної точки 1 в системі координат  $OXYZ$ ;

$X_{M1}, Y_{M1}, Z_{M1}$  - координати точки 1 на моделі в системі координат  $S_{л}X_M Y_M Z_M$ .

Матрицю  $A_{\omega_M a_M \kappa_M}$  повороту системи координат моделі складають напрямні косинуси від кутових елементів зовнішнього орієнтування  $\omega_M, a_M, \kappa_M$  моделі. Їх підставляють в рівняння (2.7) замість кутів  $\omega, a, \kappa$  і обчислюють значення напрямних косинусів.

Для обчислення семи елементів зовнішнього орієнтування моделі необхідно скласти систему із щонайменше семи рівнянь виду (2.6). Одна опорна точка з координатами  $X, Y, Z$  дозволить скласти три рівняння. Отже, для знаходження семи невідомих потрібні щонайменше три ( $7:3 = 2,3 \rightarrow$  округлюємо до більшого цілого числа  $\rightarrow 3$ ) опорні точки.

Зовнішнє орієнтування моделі виконують в два етапи:

- 1) використовуючи розходження відомих і розрахованих координат опорних точок, за рівняннями (2.6) або (2.7) визначають елементи зовнішнього орієнтування моделі;
- 2) обчислені значення елементів зовнішнього орієнтування моделі підставляють в рівняння (2.6) або (2.7) і ще раз пере обчислюють координати точок моделі з її системи координат в систему координат об'єкта.



Враховуючи, що рівняння (2.6) і (2.7) є нелінійними відносно невідомих, беруть часткові похідні по кожному з елементів зовнішнього орієнтування моделі і використовують їх як коефіцієнти при невідомих. В якості самих невідомих використовують не елементи орієнтування, а поправки до їхніх наближених значень. В свою чергу наближені значення величини елементів орієнтування встановлюють у відповідності з умовами знімання або прирівнюють нулю. В результаті замість рівнянь (2.6) отримують рівняння поправок такого виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial X_S} \delta X_S + \frac{\partial X}{\partial \omega_M} \delta \omega_M + \frac{\partial X}{\partial \alpha_M} \delta \alpha_M + \frac{\partial X}{\partial \kappa_M} \delta \kappa_M + \frac{\partial X}{\partial t_M} \delta t_M + X' - X = V_X \\ \frac{\partial Y}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial Y}{\partial \omega_M} \delta \omega_M + \frac{\partial Y}{\partial \alpha_M} \delta \alpha_M + \frac{\partial Y}{\partial \kappa_M} \delta \kappa_M + \frac{\partial Y}{\partial t_M} \delta t_M + Y' - Y = V_Y \\ \frac{\partial Z}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial Z}{\partial \omega_M} \delta \omega_M + \frac{\partial Z}{\partial \alpha_M} \delta \alpha_M + \frac{\partial Z}{\partial \kappa_M} \delta \kappa_M + \frac{\partial Z}{\partial t_M} \delta t_M - Z' - Z = V_Z \end{aligned} \right\} (2.8)$$

де  $X', Y', Z'$  - координати опорних точок, обчислені за наближеними значеннями елементів зовнішнього орієнтування моделі;

$X, Y, Z$  - істинні координати опорних точок.

Якщо використовують рівняння (2.7), то після їхньої лінеаризації отримують рівняння поправок виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial \omega_M} \delta \omega_M + \frac{\partial X}{\partial \alpha_M} \delta \alpha_M + \frac{\partial X}{\partial \kappa_M} \delta \kappa_M + \frac{\partial X}{\partial t_M} \delta t_M + \Delta X' - (X - X_1) = V_X \\ \frac{\partial Y}{\partial \omega_M} \delta \omega_M + \frac{\partial Y}{\partial \alpha_M} \delta \alpha_M + \frac{\partial Y}{\partial \kappa_M} \delta \kappa_M + \frac{\partial Y}{\partial t_M} \delta t_M + \Delta Y' - (Y - Y_1) = V_Y \\ \frac{\partial Z}{\partial \omega_M} \delta \omega_M + \frac{\partial Z}{\partial \alpha_M} \delta \alpha_M + \frac{\partial Z}{\partial \kappa_M} \delta \kappa_M + \frac{\partial Z}{\partial t_M} \delta t_M + \Delta Z' - (Z - Z_1) = V_Z \end{aligned} \right\} (2.9)$$

де  $\Delta X', \Delta Y', \Delta Z'$  - прирости координат опорних точок відносно першої, обчислені за наближеними значеннями елементів зовнішнього орієнтування моделі. При кількості опорних точок більше трьох, кількість рівнянь поправок буде



перевищувати кількість визначуваних невідомих і отже задача вирішується методом найменших квадратів. Складаємо систему рівнянь поправок

$$AX + L = V, \quad (2.10)$$

переходимо до нормальних рівнянь:

$$A'AX + A'L = 0, \quad (2.11)$$

які вирішують у відповідності до умови методу найменших квадратів

$$[VV] = \min, \quad (2.12)$$

і знаходять поправки до наближених значень елементів зовнішнього орієнтування моделі. Додавши поправки до наближених значень невідомих, знаходять нові значення елементів зовнішнього орієнтування моделі, які в свою чергу використовують для складання нової системи рівнянь поправок (2.10).

Далі наближення повторюють доти, поки величини поправок і вільних членів стануть меншими встановлених допусків.

**II етап.** Обчислені значення елементів зовнішнього орієнтування моделі підставляють в рівняння (2.6) або (2.7) і пере обчислюють координати точок моделі з її системи координат  $S_L X_M Y_M Z_M$  в систему координат  $OXYZ$  об'єкта.

В теорії фотограмметрії відомі формули для обчислення планових координат точок об'єкта в його системі координат за координатами нахиленого знімка:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S) \frac{c_{11}(x - x_0) + c_{12}(y - y_0) - c_{13}f}{c_{31}(x - x_0) + c_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S) \frac{c_{21}(x - x_0) + c_{22}(y - y_0) - c_{23}f}{c_{31}(x - x_0) + c_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Ці формули застосовуються при обчисленні елементів зовнішнього орієнтування знімка за опорними точками. Ці формули містять також три елементи внутрішнього орієнтування, значення яких уточнюються одночасно з визначенням елементів зовнішнього орієнтування. Рівняння лінеаризують і складають рівняння поправок.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial X_S} \delta X_S + \frac{\partial X}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial X}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial X}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial X}{\partial \kappa} \delta \kappa + \frac{\partial X}{\partial f} \delta f + \frac{\partial X}{\partial x_o} \delta x_o + \frac{\partial X}{\partial y_o} \delta y_o + \\ + X' - X = V_X \\ \frac{\partial Y}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial Y}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial Y}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial Y}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial Y}{\partial \kappa} \delta \kappa + \frac{\partial Y}{\partial f} \delta f + \frac{\partial Y}{\partial x_o} \delta x_o + \frac{\partial Y}{\partial y_o} \delta y_o + \\ + Y' - Y = V_Y \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

де  $\delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta \omega, \delta \alpha, \delta \kappa, \delta f, \delta x_o, \delta y_o$  - поправки до наближених значень невідомих елементів орієнтування знімка;

коефіцієнти перед поправками - часткові похідні по відповідному невідомому;

$X', Y'$  - координати опорних точок, розраховані за формулами (2.13) при підстановці в них наближених значень елементів орієнтування;

$X, Y$  - істинні (визначені з високою точністю) координати опорних точок.

Зображення на знімку однієї опорної точки дозволяє скласти два рівняння виду (2.13). Отже, для визначення дев'яти невідомих потрібно мати на знімку не менше п'яти ( $9:2 = 4,5 \rightarrow$  округлюємо до більшого цілого числа  $\rightarrow 5$ ) опорних точок. Чотири точки розміщують в кутах робочої площі знімка, а п'яту точку - в центрі знімка.

Якщо кількість опорних точок більше п'яти, то за рівняннями поправок складають систему нормальних рівнянь яку вирішують під умовою  $[vv] = \min$  і таким чином знаходять значення поправок. Додавши їх до наближених значень елементів орієнтування, отримують нові наближені значення цих елементів і, використовуючи їх, обчислюють коефіцієнти при поправках, що шукаються, а також координати  $X'$  і  $Y'$ . Обчислені значення підставляють у нові рівняння поправок і повторюють рішення.

Із збільшенням кількості наближень величини поправок і різниці координат  $X'-X$  і  $Y'-Y$  прямують до нуля. Обчислення вважають завершеними, якщо на опорних точках середнє значення залишкових розходжень координат  $X'-X$  та  $Y'-Y$  не перевищує 0,15 мм в масштабі карти чи плану.

### **Розділ 3. Експериментальне дослідження впливу опорної геодезичної мережі на точність визначення об'ємів земляних робіт за матеріалами аерознімання з БПЛА**

#### **3.1. Методика експериментальних робіт**

Для даного дослідження було обрано будівельний об'єкт по вул. Антоновича у м. Львів, який є будівництвом офісного центру та багатоповерхової житлової забудови. Умови для інженерно-геодезичних вишукувань тут складні. Будівництво ведеться на дуже обмеженому майданчику розміром 55x75м. Довкола впритул до майданчика існує багатоповерхова забудова – будинки висотою від 3 до 16 поверхів. На майданчику і безпосередньо в котловані працюють техніка, баштовий кран, інші підйомні механізми, складається обладнання та матеріали. Крім того, територія знаходиться на межі зони заборони польотів Львівського аеропорту.

Геодезичною компанією «Геовіват» (м.Львів) було виконане виконавче знімання котловану після облаштування в ньому бетонних подушок під фундамент висотної будівлі. Як геодезична опорна мережа на території будівельного майданчика закріплено шість марок для сканера - три у горизонтальній площині та три на підпірній стіні. Між цими марками виміряли віддалі для визначення горизонтального та вертикального масштабів (рис.3.2). За допомогою лазерного сканера фірми Leica-geosystems C10 (рис.3.3) з трьох станцій було виконано сканування котловану.

Опрацювання даних сканування виконувалося у програмному забезпеченні Leica Cyclone 3DR. В даному програмному забезпеченні виконувалися етапи: створення проекту, зшивання сирих даних очищення хмари від шумів. На рис. 3.4 подано опрацьовану хмару 3D точок та оцінку точності зшивання сканів. Всього хмара складається з 14,6 мільйонів тривимірних точок, просторові координати яких визначені із середньою квадратичною помилкою

бміліметрів. Ця модель поверхні котловану нами використана як завіркова для перевірки якості моделі, що буде створена за аерозніманням з БПЛА.

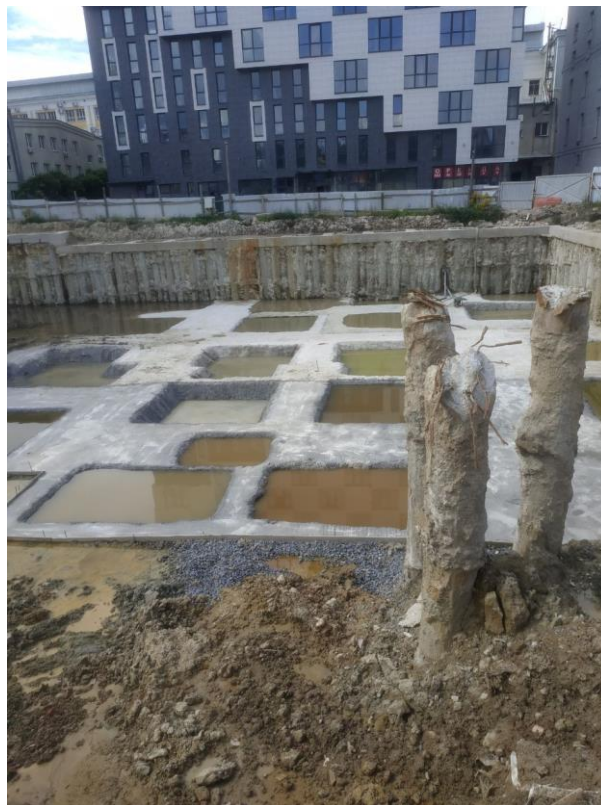


Рис.3.1. Територія та об'єкт дослідження.



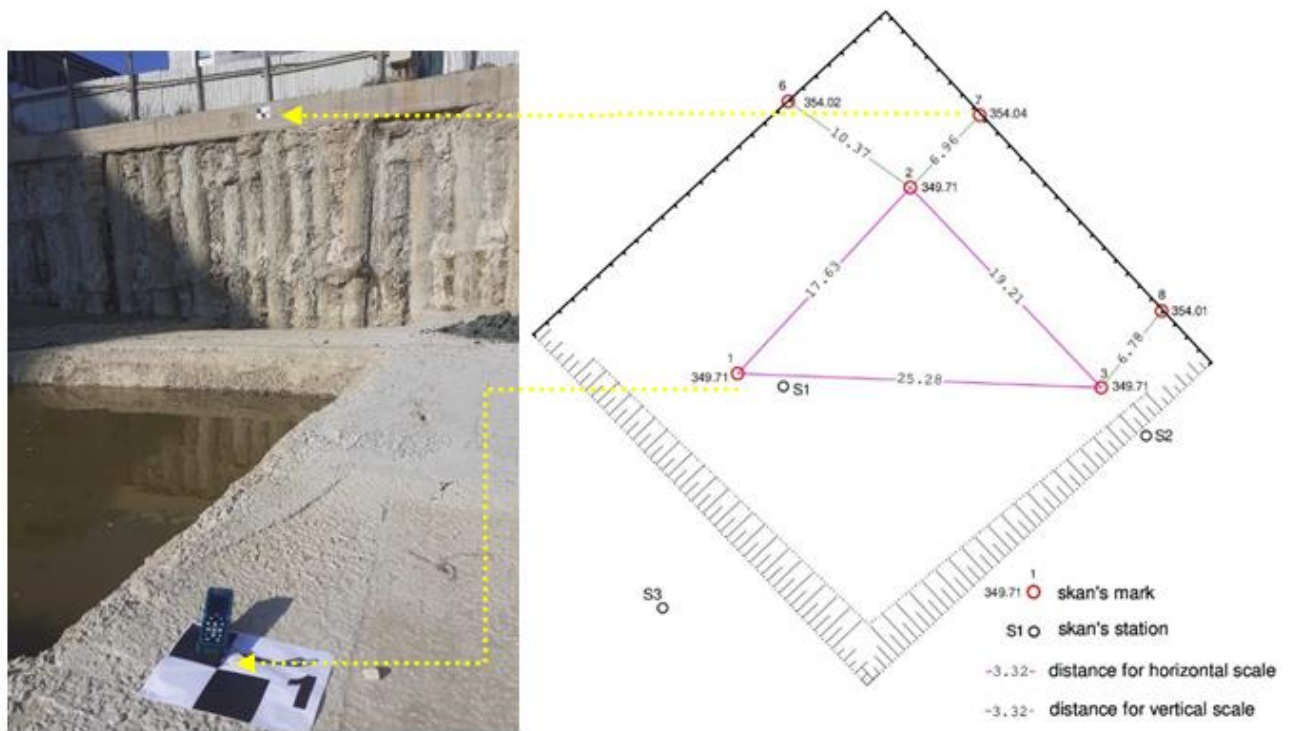


Рис.3.2. Схема знімальної мережі на будівельному майданчику



Accuracy of single measurement	Position: 6 mm Distance: 4 mm
Range	300 m
Scan rate	Up to 50,000 points/sec

Рис.3.3. Лазерний сканер фірми Leica-geosystems C10

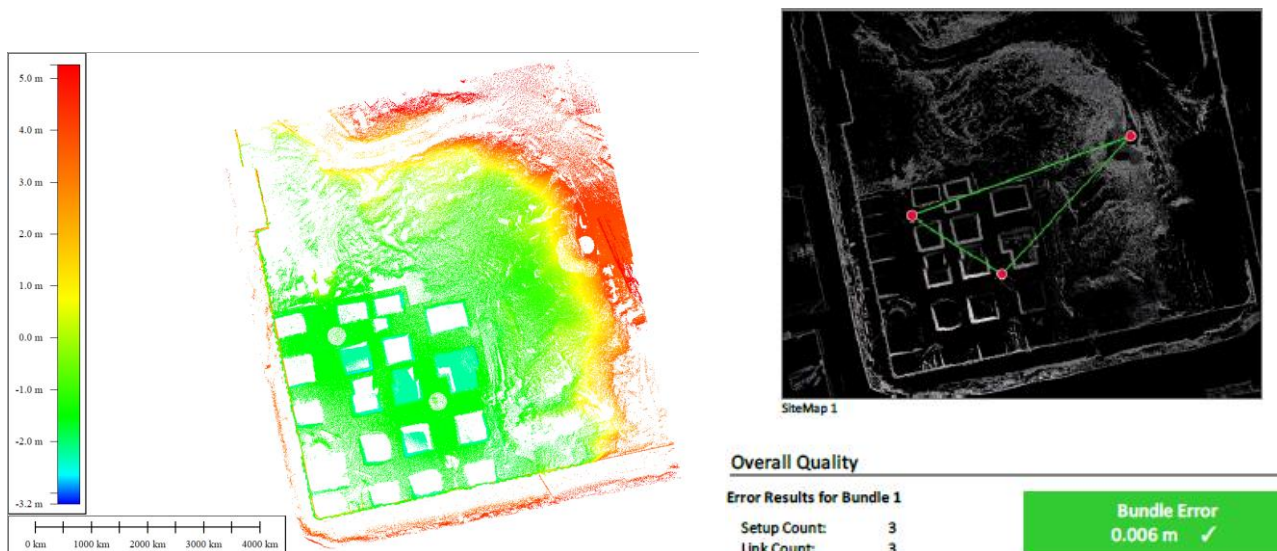


Рис.3.4. Хмара точок та точність зшивки сканів, програма Leica Cyclone 3DR

DJI Phantom 4 Pro



Для аерознімання будівельного майданчика нами використано квадрокоптер DJI Phantom 4 (DJI Technologies, м.Шеньчжень, Китай). Цей дрон оснащений модулем супутникового позиціонування і може літати за заздалегідь запроєктованим маршрутом з вертикальною точністю позиціонування  $\pm 0,5$  м і горизонтальною точністю позиціонування  $\pm 1,5$  м. У Phantom 4 інтегрована цифрова камера FC6310 з сенсором типу CMOS розміром 4864\*3648 пікселів і фокусною відстанню об'єктива 9,0 мм. Камера встановлена на трьохосовий карданний підвіс для збереження стабільності під час отримання зображення. Всього отримано 83 аерознімки з просторовим розрізненням Average Ground Sampling Distance (GSD) до 1,6см, що перевищує рекомендоване значення параметра GSD 3,5см для масштабу 1:500.

Ми скористались ресурсом <https://www.aerial-survey-base.com/gsd-calculator/help-gsd-calculator/> для розрахунків очікуваних параметрів польоту та апріорної точності створюваної фотограмметричної моделі.

Рис.3.5. Розрахунок параметрів аерознімання в програмі GSD calculator

**Estimated Mapping Accuracy:**

The selected GSD of 1,6 cm is good to make 1: 320- 1: 480 maps and is good to make 6,4 cm Orthos.

Estimated Horizontal accuracy (x,y) on marked GCP = 0,5 cm  
Estimated Vertical accuracy (z) on marked GCP = 2,3 cm

The selected GSD of 1,6 cm is sufficient to identify 0,2 meter objects in the final map scale.

Mapping Accuracy:  
= 6,4 cm = 0,2 ft = 1 in.

Image Geo-referencing (IMU, Positioning of lens perspective center):  
= 1,8 cm = 0,1 ft = 0,7 in.

Image Geo-referencing (AT, Block x,y,z RMSE):  
= 1 cm = 0 ft = 0,3 in.

max. x,y,z control point residual error:  
= 1,9 cm = 0,1 ft = 0,8 in.

Рис.3.6. Розрахунок очікуваної точності геоприв'язки аерознімків в програмі GSD calculator.

Як видно на рисунку 3.5 розрахункова висота знімання складає 75м над поверхнею землі, а відношення базису фотографування до висоти  $b/H = 0.24$  досягається при взаємному перекритті знімків 75%.

Розрахунки підтверджують можливість створення за такими знімками ортофотопланів масштабів від 1:320 до 1:480. Рекомендована точність визначення планових координат опорних точок складає 0,5см, а висотних координат опорних точок складає 2,3см. У випадку використання дрона з обладнанням РТК рекомендована точність визначення просторових координат центрів проєкцій складає 1,8см. Априорна (максимально досяжна) точність при таких умовах геоприв'язки створюваного ортофотоплану дорівнює 6,4см.

### 3.2. Фотограмметричне опрацювання аерознімків.

Цифрове фотограмметричне опрацювання – це виробничий процес, в якому використовується цифрова форма представлення зображення та аналітичні дії їх перетворення на базі засобів обчислювальної техніки для побудови геометричної моделі об'єкта, аналізу та вимірювання координат.

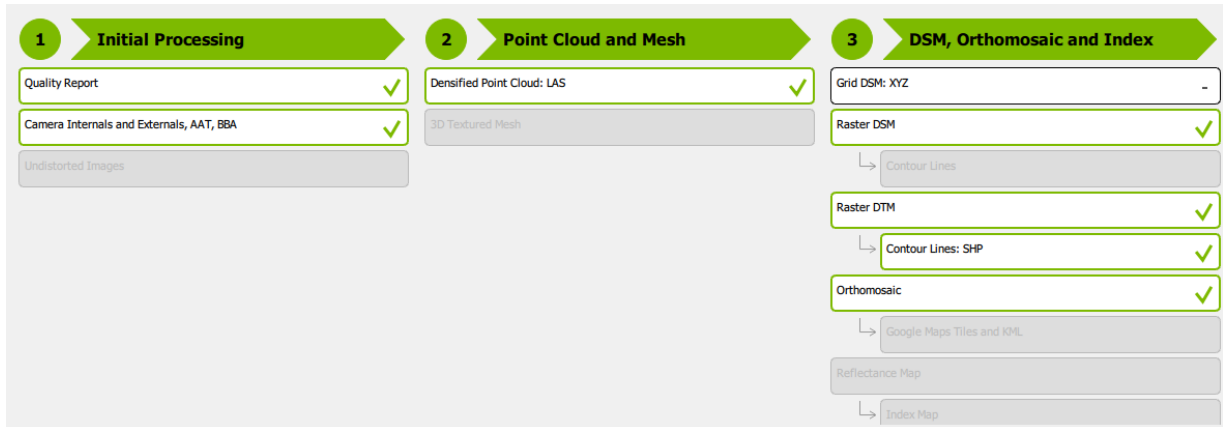


Рис.3.7. Послідовність процесів опрацювання аерознімків в програмі Pix4Dmapper.

Конвеєр, показаний на малюнку 2, був застосований до зображень, зібраних БПЛА, щоб отримати хмару точок із геоприв'язкою. Алгоритм SfM-MVS, реалізований у програмному забезпеченні Pix4Dmapper, використовувався для вирівнювання зображень на основі зіставлення точок стереопар високої щільності. Це дозволяє обчислити положення камери, орієнтацію для кожного зображення та побудувати хмари точок, моделі поверхонь місцевості та ортофотоплан. Pix4Dmapper — добре відоме в світі програмне забезпечення, здатне створювати високоякісні тривимірні хмари точок за допомогою фотограмметричних процедур на основі знімків БПЛА.

Після завантаження файлів зображень і каталогу координат опорних точок. Функція GCP/MTP Manager вмикає редактор опізнавання опорних точок на знімках. Крім 8 опорних точок було застосовано Процедуру масштабування фотограмметричної моделі через інструмент «Обмежувач масштабу». В програмному забезпеченні Pix4D таким чином можна використовувати не тільки



координати опорних точок, а й контрольні проміри довжин ліній між точками які добре розпізнаються на знімках і відстані між якими можна виміряти в котловані, скориставшись рулеткою.

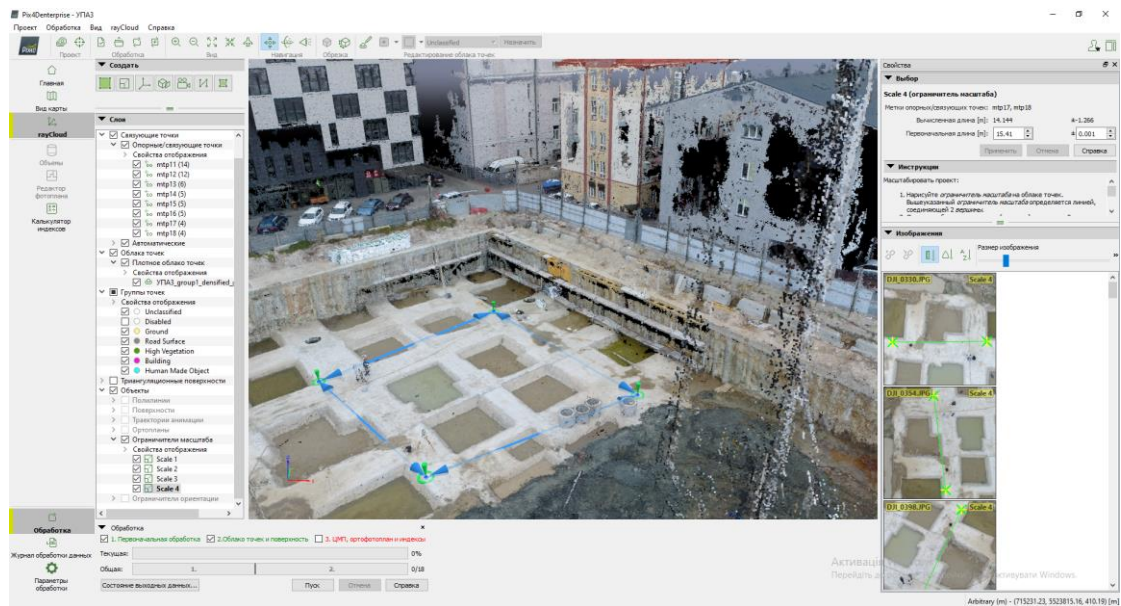


Рис.3.8. Процедура масштабування моделі через інструмент Обмежувач масштабу в програмному забезпеченні Pix4D.

Всі наступні етапи опрацювання виконуються автоматично. Ортофотоплан створюється з розрізненням аерознімків, тобто 1,6см, а растрова ЦМР – з розрізненням вдвічі грубішим, тобто 3,2см.

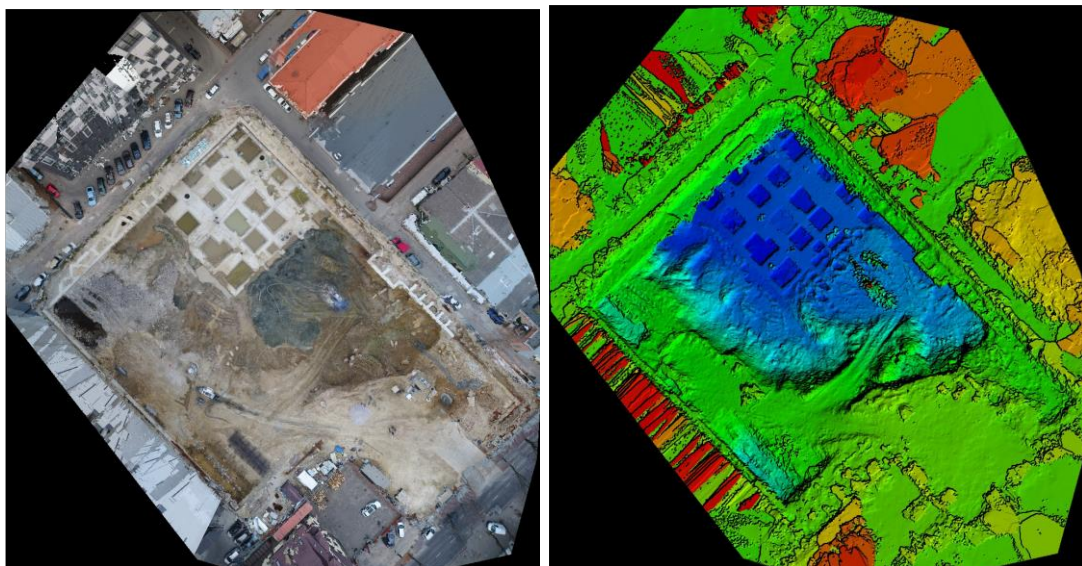


Рис.3.9. Ортофотоплан і растрова ЦМР, створені за матеріалами аерознімання з БПЛА.

### 3.3. Порівняння ЦМР створених за матеріалами аерознімання з БПЛА та ЦМР створеною наземним лазерним скануванням

Після того як 3D моделі побудовані в програмі ГІС Глобал Маппер побудуємо різницю двох поверхонь – створеної за хмарою точок з наземного лазерного сканування і створену за аерознімками з БПЛА. Для цього скористаємось кнопкою інструмента Combine Terrain Options. Результат – новий растр, значення комірок якого є розходженнями висот ЦМР від еталону:

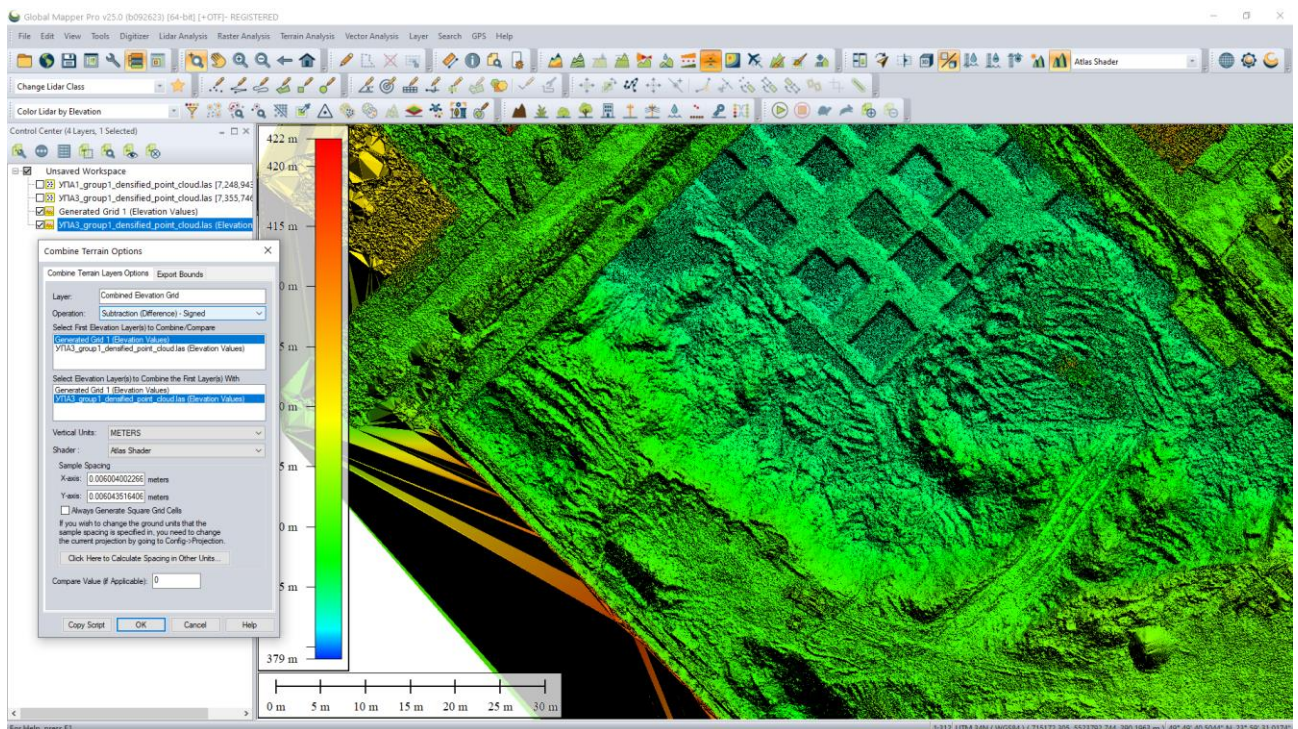


Рис. 3.10. Пошук нового растру як різниці двох ЦМР

Оцінити розходження можемо, побудувавши профілі по отриманій новій карті. Тут виявляється, що відхилення на відкритих ділянках території близькі до нуля, тобто обидві ЦМР практично співпадають. Але також присутні артефакти – це додатні та від’ємні «відскоки», які можна пояснити тим, що в моделі, створеній наземним лазерним скануванням є мертві зони – це огороження, ділянки за автомобілями й іншими предметами. Також по різному описується поверхі вкриті водою – лазерне випромінення там повністю поглинається і жодних даних в ЦМР тут не буде, а при опрацюванні аерознімків часто виникає артефакт заниження відмітки висоти.



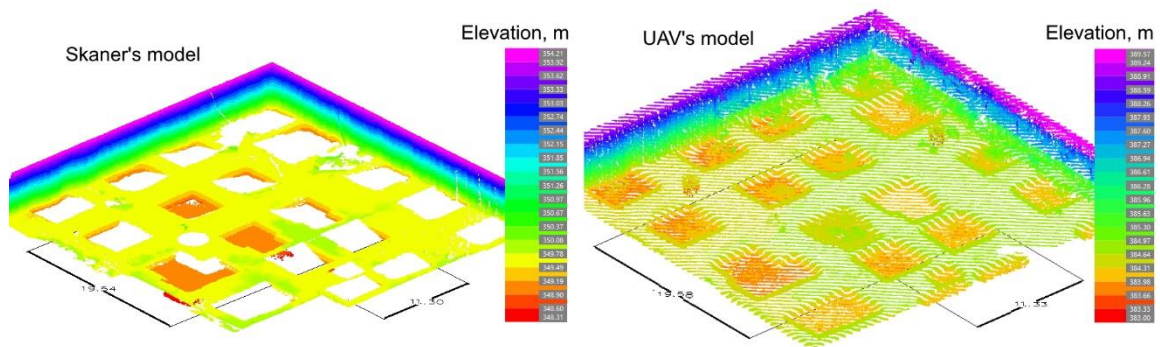
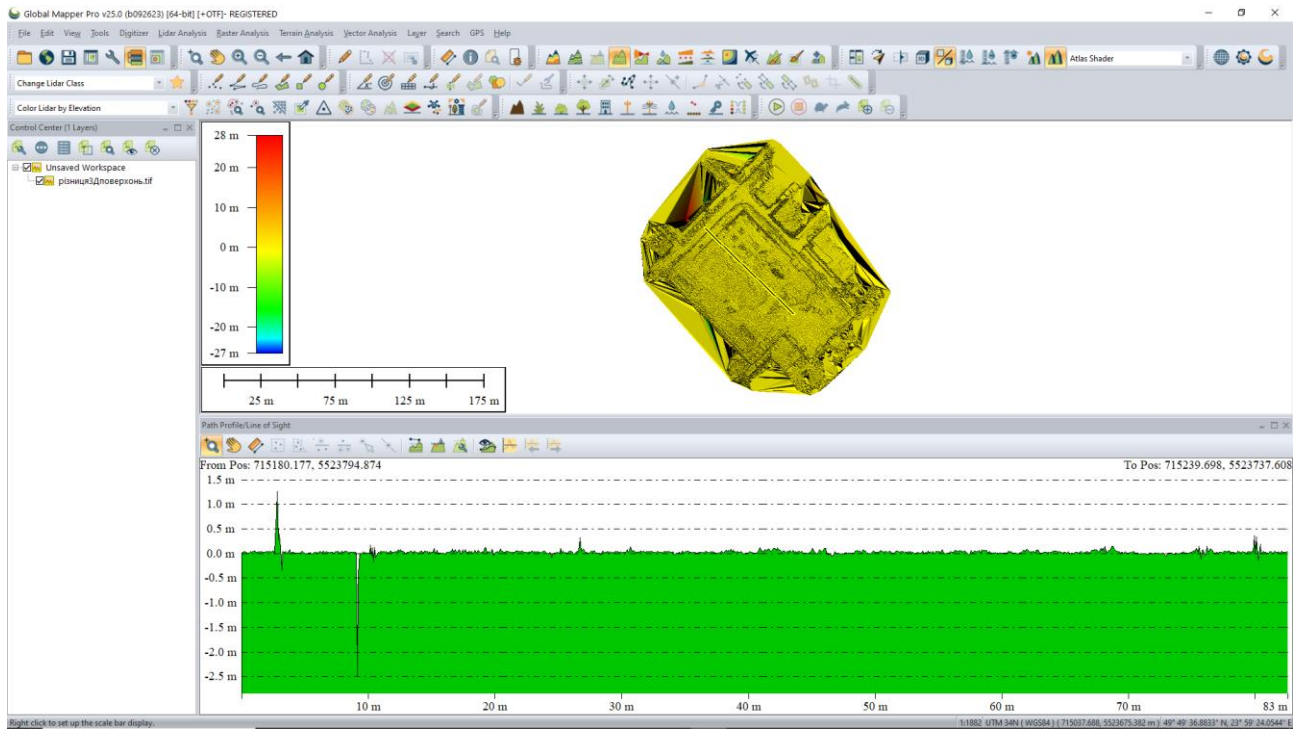
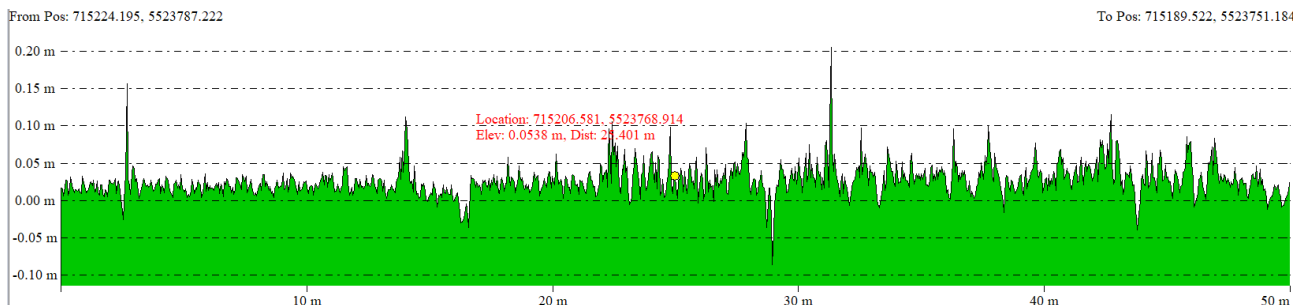


Рис. 3. 11. Графічне зображення різниць ЦМР і еталонної поверхні.

Загалом графік розподілу помилок ЦМР показує деяке несуттєве за модулем, але систематичне завищення висотних відліків:



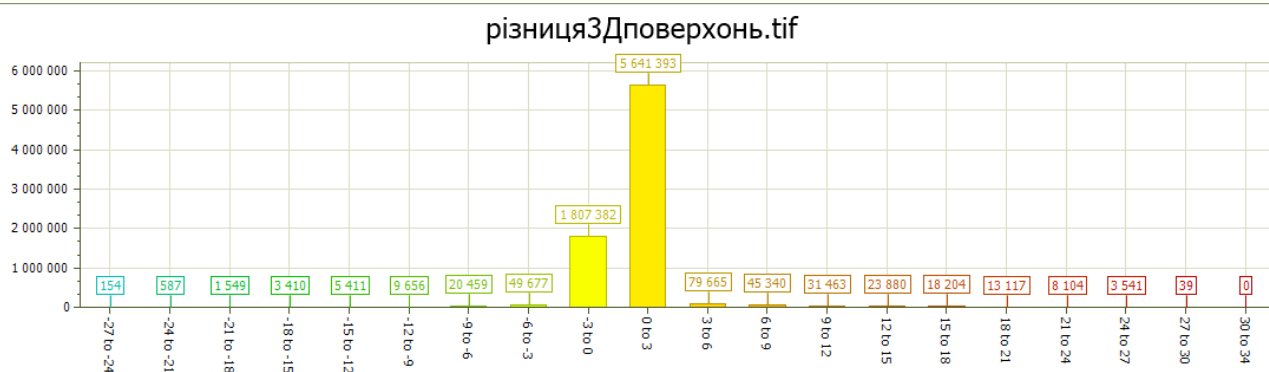
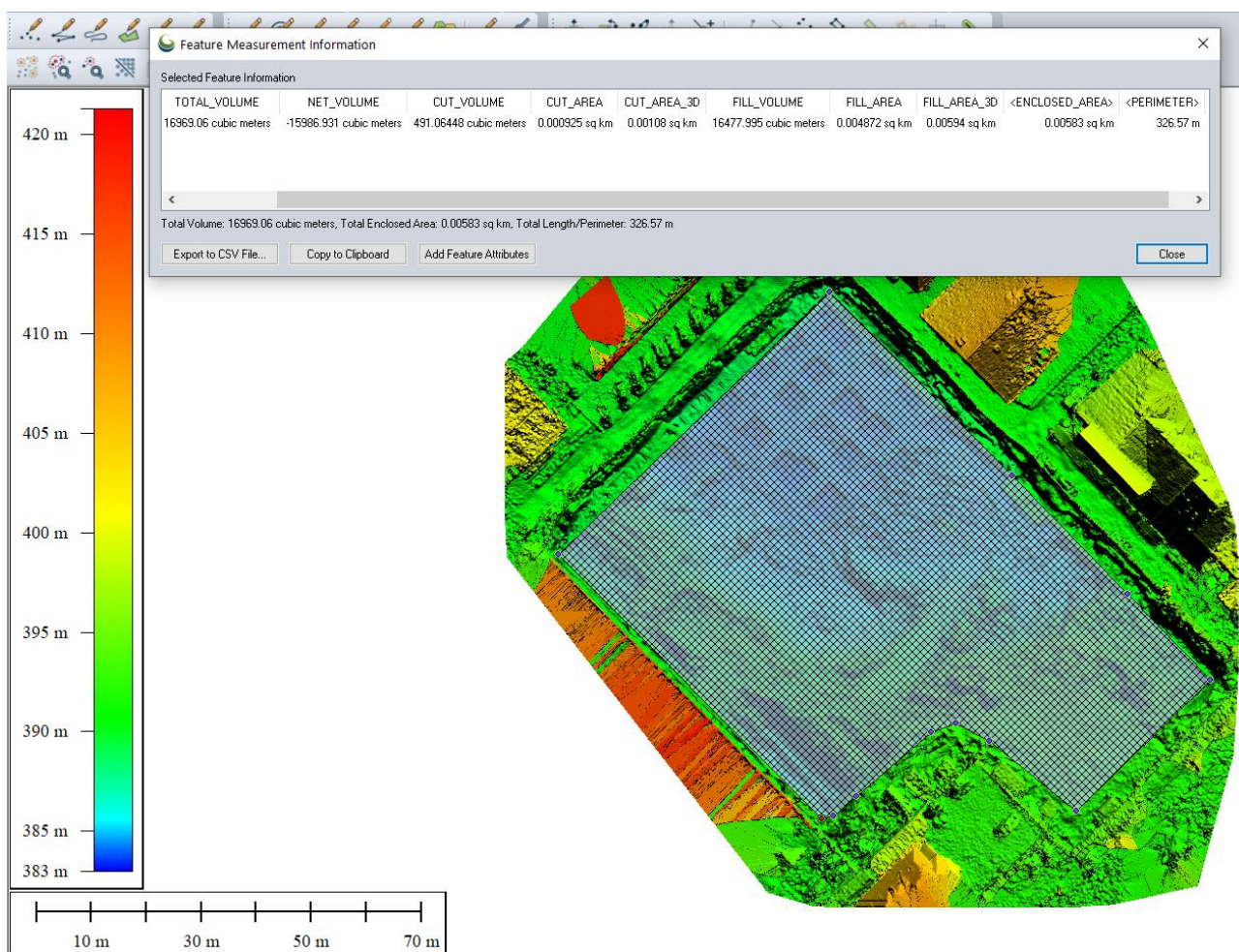


Рис.3.12. Графік розподілу помилок ЦМР

### 3.4. Оцінка результатів визначення об'єму котлована.

Отриману в результаті фотограмметричного опрацювання растрову ЦМР використано для обчислення об'єму котловану



Виїмка: об'єм= 491.06448 cubic meters; площа = 0.000925 sq km

Насип: об'єм=16477.995 cubic meters; площа =0.004872 sq km

Total Volume: 16969.06 cubic meters

Total Enclosed Area: 0.00583 sq km

Total Length/Perimeter: 326.57 m

Отримані значення об'ємів на 2% відрізняються від знайдених аналогічних параметрів за еталонною ЦМР. Площі вірізняються на 1,6%.

## 4. Охорона довкілля

При проектуванні і виконанні інженерно-геодезичних вишукувань, топографічних знімачів та геодезичному супроводі технологічних процесів важливою умовою є досягнення максимального збереження лісових і сільськогосподарських земель, пасовищ ріллі та інших угідь. Для цього прокладку планово-висотних ходів здійснюють вздовж ґрунтових і польових доріг і стежок, розміщують геодезичні пункти і точки знімальних мереж в місцях відсутності насаджень і посівів, у смузі відведення автомобільних доріг та залізниць, на межах.

При перевезенні працівників та геодезичного обладнання транспортними засобами необхідно звести до мінімуму пошкодження рослинного покриву та верхнього шару ґрунтів, уникати переміщення територіями цінних угідь. При геодезичних вишукуваннях проведення лісових вирубок і прорубка просік виконується тільки при наявності спеціального дозволу.

При створенні знімальних мереж з їх закріпленням знаками на місцевості слід при можливості використовувати природні контури місцевості й вже існуючі місцеві об'єкти для розміщення геодезичних пунктів, що виключає нанесення шкоди природному середовищу.

В процесі виконання робіт не допускається забруднення стічних вод і загалом оточуючого середовища, зберігати ліси, торфовища і сільськогосподарські угіддя від пожеж. Також як екологічна шкода трактується пошкодження, руйнування або знищення об'єктів, споруд, будівель що настали при провадженні діяльності, пов'язаної з виконанням певних видів топографо-геодезичних і картографічних робіт.

У відповідності до документа «Критерії, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) за топографо-геодезичною і картографічною діяльністю Державною службою з питань

геодезії, картографії та кадастру», затверджених постановою Кабінету Міністрів України наказом від 19 вересня 2018 р. № 765 встановлюється перелік критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері топографо-геодезичної і картографічної діяльності. Одним з критеріїв зокрема є «Провадження діяльності, пов'язаної з виконанням певних видів топографо-геодезичних і картографічних робіт». Показник критерію: «провадження діяльності, пов'язаної з виконанням топографо-геодезичних робіт на об'єктах, що становлять підвищену екологічну небезпеку, – атомної енергетики; видобування нафти і природного газу; вугільної, гірничодобувної промисловості; будівництва гідроенергетичних та гідротехнічних споруд і меліоративних систем; будівництва аеропортів, залізничних вузлів і вокзалів, автовокзалів, річкових і морських портів, залізничних і автомобільних магістралей, метрополітенів та/або на об'єктах, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави та/або топографо-геодезичних і картографічних робіт загальнодержавного призначення».

Визначено ризики настання негативних для навколишнього природного середовища наслідків від провадження господарської діяльності у сфері топографо-геодезичної і картографічної діяльності. Подіями, що містять ризики настання таких негативних наслідків визначено порушення вимог нормативно-правових актів у сфері топографо-геодезичної і картографічної діяльності під час виконання робіт на об'єктах, що становлять підвищену екологічну небезпеку, – атомної енергетики; видобування нафти і природного газу; вугільної, гірничодобувної промисловості; будівництва гідроенергетичних та гідротехнічних споруд і меліоративних систем; будівництва аеропортів, залізничних вузлів і вокзалів, автовокзалів, річкових і морських портів, залізничних і автомобільних магістралей, метрополітенів.

Суттєвий вплив на умови виконання геодезичних вишукувань мають організаційно-технологічні рішення будівництва в обмежених міських умовах, коли вплив на довкілля обумовлюють:

- викидами в атмосферне повітря продуктів згоряння палива автотранспорту та будівельно-дорожніх машин;

- викидами в атмосферне повітря під час проведення будівельних процесів (пересипання сипких будівельних матеріалів);

- викидами в атмосферне повітря при проїзді автомобільного транспорту та будівельно-дорожніх машин (пиляння);

- комплексним шумовим впливом (робота автотранспорту та будівельно-дорожньої техніки, робота інструментарію, різні виробничі процеси);

- комплексним вібраційним впливом (робота автотранспорту та будівельно-дорожньої техніки, робота інструментарію, різні виробничі процеси);

- впливом на ґрунтовий покрив (зняття родючого та потенційно-родючого шарів ґрунту);

- впливом на геологічне середовище та підземні води (проведення будівельних робіт з організації підземних частин будівель та споруд).



## 5. Охорона праці.

Використання геодезичних лазерних приладів пов'язане із певною небезпекою для здоров'я людини. Основним нормативним документом є публікація №825 Міжнародної технічної комісії (МТК) під назвою «Радіаційна безпека лазерних виробів, класифікація обладнання, вимоги та керівництво для споживачів» як найбільш компетентна рекомендація світового класу.

Безпосередньо на людину впливає лазерне випромінювання будь-якої довжини хвилі; однак, у зв'язку зі спектральними особливостями ураження органів та суттєво різними гранично допустимими дозами опромінення зазвичай розрізняють вплив на очі та шкірні покриви людини. Основний шкідливий вплив лазерне випромінювання створює на сітківку ока, причому кришталик (і очне яблуко), діючи як додаткова фокусуюча оптика, істотно підвищує концентрацію енергії на сітківці. Діапазон довжин хвиль шкідливого на сітківку ока від 0,4 до 1,4 мкм. Тривалість дії також впливає на травматизацію ока. Наприклад, якщо лазер видимих довжин хвиль (400 до 700 нм), потужність променя якого становить менше 1,0 МВт, а час експозиції становить менше 0,25 с (час, на який людина заплющить око), жодних пошкоджень на сітківці ока не буде.

Вимоги МТК до виробників лазерних приладів у зв'язку із забезпеченням безпеки користувачів стосуються уніфікації вимог до конструкцій лазерних приладів розділяти ці прилади на чотири класи з точки зору безпечності лазерного випромінювання для користувачів. Найбільш безпечними як за своєю природою, так і за конструктивним виконанням є прилади класу 1 — повністю безпечні лазери, вихідне випромінювання яких не є небезпечним для очей і шкіри людини. Лазери 1 класу є безпечними при дотриманні звичайних умов їхньої експлуатації і не є небезпечними якщо використовуються у відповідності з інструкціями.

Лазери класу 1,2А та 2 підпадають під цю категорію і, як правило, не можуть нашкодити сітківці. На жаль, при прямому або відбитому попаданні лазера класу 3А, 3В, або 4 і дифузних відбиття лазерів вище 4 класу можуть

з'явитися ушкодження, перш ніж людина зможе рефлекторно заплющити очі. Для імпульсних лазерів тривалість імпульсу також впливає потенційну шкоду для очей. Імпульс менш ніж на 1 мс при попаданні на сітківку може спричинити акустичні перехідні ефекти, що призводить до суттєвих збитків та кровотеч на додаток до очікуваних теплових ушкоджень. Багатоімпульсні лазери в даний час мають час імпульсу менше 1 пікосекунд (пс).

Застосований в експериментальній частині роботи наземний лазерний сканер Leica ScanStation C10 відноситься до класу лазера 3R у відповідності із стандартом ІЕС 60825-1 (2014-05): "Безпека лазерних пристроїв".

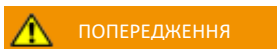
Вироби, класифіковані як лазерні пристрої класу 1, класу 2 та класу 3R, не вимагають залучення експерта з лазерної безпеки, застосування захисного одягу та окулярів, встановлення попереджувальних знаків у зоні виконання вимірювань.

Вироби, класифіковані як лазерні пристрої класу 2 або 3R, можуть викликати короткочасне засліплення і залишкове зображення на сітківці, особливо при низькому рівні навколишнього освітлення.

В технічній документації геодезичного обладнання прийнято позначати рекомендації щодо порядку безпечного застосування:



- Означає безпосередньо небезпечну ситуацію, яка може призвести до серйозних травм або навіть до летального результату;



- Означає потенційно небезпечну ситуацію або нештатне застосування приладу, яка можуть призвести до серйозних травм;



-Означає потенційно небезпечну ситуацію або нештатне застосування приладу, яка можуть призвести до незначних або помірних травм;



-Вказує на потенційно небезпечну ситуацію яка може призвести до значної матеріальної, фінансової або екологічної шкоди;



- Важливі розділи документа, що обов'язкові до виконання для забезпечення ефективного використання обладнання;



-Нагадування про використання пристроїв тільки в сухих місцях, із забезпеченням захисту від вологи. Заборона використання при підвищеній вологості;



-Нагадування про необхідність заземлення силових кабелів і місць знімання напруги.

При роботі з лазерними геодезичними приладами з потужністю випромінювання понад 1 мВт забороняється:

- у момент генерації випромінювання здійснювати візуальний контроль точності візування на відбивач без застосування захисних засобів;
- спрямовувати промінь лазера на очі чи інші частини тіла людей;
- наводити лазерний промінь на поверхні, що відбивають (дзеркала, поліровані матеріали, скла).

Геодезичні прилади з лазерними випромінювачами, що мають потужність у безперервному режимі більше 1 мВт у видимій частині спектру, повинні під час експлуатації мати позначатись плакатом із попереджувальним написом «Обережно! Лазерне випромінювання». При роботі з ними необхідно стежити, щоб лазерний пучок не потрапляв в очі.

Під час проведення зйомок або розбивок на будівельному майданчику виникає небезпека нещасних випадків, якщо не звертати уваги на навколишні умови (наприклад, різні перешкоди, земляні роботи або транспорт). Недостатнє забезпечення безпеки на місці проведення робіт може призвести до небезпечних ситуацій, наприклад, в умовах інтенсивного руху транспорту, на будівельних майданчиках або в промислових зонах.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

В магістерській кваліфікаційній роботі дано аналіз теоретичних положень геодезичного забезпечення проектів аерознімання будівельних майданчиків з безпілотних літальних апаратів. Метою такого знімання є створення цифрової моделі місцевості інженерного призначення, зокрема такої її важливої частини як модель рельєфу. Досліджено методику цифрового моделювання території будівельного майданчика у м.Львів із складними умовами виконання інженерно-геодезичного супроводу будівництва.

Це дослідження розглядає проблему створення 3D моделей за аерознімками, отриманими БПЛА за умови обмеженої геодезичної підготовки проекту. Ми демонструємо метод створення інженерної моделі місцевості, який реалізує можливості безпілотників. Обов'язковою умовою є геоприв'язка аерознімків та створення мережі наземних опорних точок. Також як опорна інформація використовується множина різнонаправлених вимірів ліній. Ці лінійні проміри використовуються при обробленні блоку аерознімків в спеціальному програмному забезпеченні як обмежувачі масштабу. Як і у випадку із застосуванням наземних опорних точок, обмежувачі масштабу повинні розміщуватись так, щоб охоплювати всю досліджувану територію і не належати одній площині. Наш експеримент показує, що запропонований підхід на локальних майданчиках дозволяє отримати прийнятну точність 3D моделювання рельєфу на рівні 1,5-2% порівняно з найбільш точним методом наземного лазерного сканування. Цього рівня точності достатньо для потреб багатьох практичних інженерних застосувань – таких як наприклад виконавчі знімання з визначенням об'ємів земляних робіт.

Виконання лінійних промірів на території є доступним для більшості фахівців не геодезичного профілю і не вимагає складного обладнання. Це робить процес знімання і оброблення фотограмметричного проекту доступним за ціною і швидким порівняно з використанням спеціально обладнаних дронів і створенням наземної мережі опорних точок. Очевидним обмеженням

запропонованого підходу є можливість його застосування на порівняно невеликих майданчиках та певні незручності у застосування вільно орієнтованої 3D моделі в геоінформаційних та CAD системах.

Дано пропозиції з охорони праці при виконанні аерознімання з безпілотних літальних апаратів та охорони навколишнього середовища.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Aguilar, F. J., Rivas, J. R., Nemmaoui, A., Peñalver, A., & Aguilar, M. A. (2019). UAV-Based Digital Terrain Model Generation. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(8), 1934. <https://doi.org/10.3390/s19081934>
2. Babiy Lyubov, Kolb Ihor, Dychko Lubomyr. Method of collection of control points for georeferencing of aerial and space images. The 9th international scientific-technical conference “Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics. Modern Technologies and Development Perspectives” 17-20 September 2019. Lublin, Poland. Book of Abstracts -pp.25-26. <https://eepgtech.urk.edu.pl/>
3. 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.
4. Nex F, Remondino F. Preface: Latest Developments, Methodologies, and Applications Based on UAV Platforms. *Drones*. 2019; 3(1):26. <https://doi.org/10.3390/drones3010026>
5. Ostrovskyi A., Kolb I., Vivat A., Lozynskyi V., Zhyvchuk V. Simplified method of obtaining data for calculating the volume of earthworks based on aerial survey materials from UAVs [Електронний ресурс] // GeoTerrace-2021 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 4–6 жовтня 2021 р., Львів, Україна. – 2021.
6. Propeller. Available from: <https://www.propelleraero.com/aeropoints/>.
7. The BIM Project Execution Planning Guide, BIM Manual Civil Works and Infrastructure, MT Højgaard, December 2016: [Електронний ресурс]. URL: <http://mth.com/Knowledge/CAD-BIMmanuals>

8. Trevoho, Ihor ; Ostrovskiy, Apollinariy ; Kolb, Ihor ; Ostrovska, Olena ; Zhyvchuk, Viacheslav. The study of local terrain modeling methods for vertical planning of the territory. *GEODESY AND CARTOGRAPHY*. Vol. 70, no. 2, article no. e09, 2021 DOI: <https://doi.org/10.24425/gac.2021.136684>
9. Баран П. І. Інженерна геодезія : монографія. К. : ПАТ «ВІПОЛ», 2012. 618с.
10. Баран П. І., Марущак М. П. Методи вертикального планування для будівельних майданчиків. *Вісник геодезії та картографії*, 2011. № 6. С. 9-15.
11. Бачишин Б.Д. Інженерна геодезія : навч. посіб. [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2020. – 196 с. [Електронний ресурс]. URL: [https://ep3.nuwm.edu.ua/19290/1/Посібник\\_інж\\_геод\\_вип\\_1.pdf](https://ep3.nuwm.edu.ua/19290/1/Посібник_інж_геод_вип_1.pdf)
12. Виконавча зйомка котловану. [Електронний ресурс]. URL: [https://geotop.com.ua/ispolnitelnaya-syomka-kotlovana\\_ua.php](https://geotop.com.ua/ispolnitelnaya-syomka-kotlovana_ua.php)
13. Войтенко С. П. Інженерна геодезія : підручник. 2-е вид., виправ. і доп. К.: Знання, 2012. 574 с.
14. Гапіч Г. В. Обчислення об'ємів земляних робіт для вертикального планування рельєфу при проведенні інженерно-меліоративних заходів / Г. В. Гапіч, А. В. Зуска // Меліорація і водне господарство. – 2019. - №2. - С. 250 - 257. [Електронний ресурс]. URL: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/2849>
15. Геодезичне забезпечення будівництва. Частина 1. : навчальний Г35 посібник / [Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Бікс Ю. С., Вовк Т. Ю.] – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 98 с.
16. Гончаренко, Т.А. Застосування ВІМ-технології для створення цифрової моделі території під забудову [Текст] / Т.А. Гончаренко // Управління розвитком складних систем. – 2018. – № 33. – С. 131 – 138.
17. ДБН В.1.3-2:2010 "Геодезичні роботи у будівництві". Наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 21.01.2010 р. № 20
18. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПІН 3.3.2.007-98

- [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98#Text>
- 19.Дорожинський О. Л. Математичні моделі аналітичної та космічної фотограмметрії: монографія. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. 142 с.
- 20.Дорожинський О.Л., Колб І.З., Бабій Л.В., Дичко Л.В. Метод отримання опорних точок для геометричної корекції аеро та космічних знімків місцевості// ISTCGCAP.2020; Випуск 92, 2020, Номер 92:15-23 [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgsap2020.92.015>
- 21.Колб І.З. Забезпечення фотограмметричних проектів опорною інформацією, отриманою з великомасштабних аерознімків. // Вид-во «Львівська Політехніка»; «Геодезія, картографія і аерофотознімання». – Міжв. Наук.-техн. зб. – Вип.87.-2018. – С. 65-74
- 22.Міхно П., Лісовенко І., Бушуєв Д., Риженко І. Особливості застосування сучасних геодезичних технологій у будівництві. 2022. №3(29). С. 198-209. [Електронний ресурс]. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/268158/263920>
- 23.Наказ «Про затвердження Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» №207 від 14.02.2018. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18#Text>
- 24.Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (Проект). <https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2021/12/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82.pdf>
- 25.Про затвердження інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 ТА 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). 1998. [Електронний ресурс]. URL: <https://ZAKON.RADA.GOV.UA/LAWS/SHOW/Z0393-98>.
- 26.Федишин Ю.І., Будз М.Д. Інженерні вишукування. – Рівне: НУВГП, 2016 -158с.