

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА і АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра інженерної геодезії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дем'яненко Р.А. _____

« _____ » _____ 2023 року

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

на тему:

Методика створення ЦМР з результатів лазерного сканування та
БПЛА знімання

Виконав студент групи _____ ГДм-22 _____

_____ 193 Геодезія та землеустрій _____

(спеціальність)

_____ Геодезія _____

(спеціалізація)

_____ Гончаров Антон Сергійович _____

Керівник _____ Медведський Ю. В. _____

_____ к.т.н., доцент _____

Київ 2023 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА і АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра інженерної геодезії

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

на тему:

«Методика створення ЦМР з результатів лазерного сканування та БПЛА знімання»

Гончаров Антон Сергійович

Київ 2023р.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра інженерної геодезії

Освітній рівень: магістр за освітньо-професійною програмою

Спеціальність: 193 - Геодезія та землеустрій

Спеціалізація: «Геодезія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
декан факультету ГІСУТ
Нестеренко О. В.

« _____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

Гончаров Антон Сергійович

1. Тема роботи «Методика створення ЦМР з результатів лазерного сканування та БПЛА знімання».

затверджена наказом ректора КНУБА № 2529/2
від «24» жовтня 2023 року

2. Керівник роботи к.т.н., доцент Медведський Юрій Вікторович.

3. Строк подання студентом роботи до захисту до 06.11.2023 – 10%, до
.11.2023 – 60%, до .12.2023 – 100%.

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р.1 використання даних лазерного сканування та БПЛА знімання для створення ЦМР

Р.2 Методика виділення ЦМР

Р.3 Дослідження методик виділення ЦМР

5. Графічний матеріал за розділами

Р.1 Аналіз методів створення ЦМР, аналіз публікацій щодо використання даних БПЛА знімання та лазерного сканування для отримання ЦМР, поняття цифрової моделі рельєфу, перспективи та проблеми при використанні лазерного сканування та БПЛА знімання для створення.

Р.2 Характерні особливості хмари точок лазерного сканування та БПЛА знімання, аналіз засобів для класифікації хмари точок, методика виділення та побудови ЦМР.

Р.3 Побудова ЦМР за даними наземного лазерного сканування, побудова ЦМР за даними БПЛА лазерного знімання, побудова ЦМР по даним БПЛА знімання забудованих територій.

6. Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1	до 06.11.2023
Розділ 2	до 13.11.2023
Розділ 3	до 20.11.2023
Розділ 4	до 27.11.2023
Остаточне оформлення роботи	до 29.11.2023
Направлення роботи на рецензування та плагіат	до 01.12.2023
Попередній захист роботи на кафедрі	до 07.12.2023

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 1			
Розділ 2			
Розділ 3			
Розділ 4			

8. Дата видачі завдання 31 серпня 2020 року .

Зав. Кафедри

_____ (підпис)

Р.А. Дем'яненко .
(прізвище та ініціали)

Керівник

_____ (підпис)

Ю.В. Медведський .
(прізвище та ініціали)

Студент

_____ (підпис)

А.С. Гончаров .
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА БПЛА ЗНІМАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦМР

- 1.1 Аналіз методів створення ЦМР
- 1.2 Аналіз публікацій щодо використання даних БПЛА знімання та лазерного сканування для отримання ЦМР
- 1.3 Поняття цифрової моделі рельєфу
- 1.4 Перспективи та проблеми при використанні лазерного сканування та БПЛА знімання для створення ЦМР

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ВИДІЛЕННЯ ЦМР

- 2.1 Характерні особливості хмари точок лазерного сканування та БПЛА знімання.
- 2.2 Аналіз засобів для класифікації хмари точок
 - 2.2.1 Алгоритми класифікації хмари точок
 - 2.2.2 Програмні комплекси для класифікації хмари точок
- 2.3 Методика виділення та побудови ЦМР
 - 2.3.1 Методика виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Agisoft Metashape
 - 2.3.2 Методика виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Cloudcompare
 - 2.3.3 Методика виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Quick terrain model

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК ВИДІЛЕННЯ ЦМР

- 3.1 Побудова ЦМР за даними наземного лазерного сканування
- 3.2 Побудова ЦМР за даними БПЛА лазерного знімання
- 3.3 Побудова ЦМР по даним БПЛА знімання забудованих територій

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

ВСТУП

Рельєф є одним з найважливіших елементів змісту будь-якої карти, що визначає всі особливості ландшафту. Характер рельєфу враховується у процесі освоєння та заселення території, розвитку транспорту, промисловості, сільського господарства і будівництва, вибору місця для населених пунктів, бойових дій (визначення можливостей відкритого пересування, маскування, умов прохідності, невидимості). Рельєф впливає на розподіл тепла й вологи, міграцію хімічних елементів, формування поверхневого та підземного стоку, річкової мережі, рослинного покриву, ґрунтів, ландшафтів тощо. З того часу, як з'явилися перші карти, перед картографами постала нетривіальна проблема відображення тривимірного рельєфу на двовимірній карті. Вся історія дослідження рельєфу – це історія створення його картографічних моделей, які постійно наближаються до дійсності.

Одним із перших способів відображення рельєфу стали перспективні знаки, що показують гори і пагорби. Перспективний (картинний) спосіб зображення рельєфу широко застосовувався до середини XVIII століття, але він не дозволяв визначати по карті крутизну схилів і виражати всі характерні деталі рельєфу, особливо на рівнинній місцевості. Однак починаючи з XVIII ст. почалася активна розробка нових, все більш складних способів відображення рельєфу. Перші експерименти зі створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР), що відносяться до першого етапу розвитку геоінформатики, одразу ж засвідчили, що вони є унікальним інструментом для аналізу різноманітних антропогенних об'єктів і природних процесів і явищ.

Оскільки рельєф земної поверхні зазнає інтенсивних змін під впливом як природних, так і антропогенних чинників, то актуальним є завдання швидкого корегування і відображення цих змін у ЦМР з найменшими фінансовими і часовими витратами. Для цього потрібно провести огляд наявних моделей створення ЦМР з метою їх порівняння і визначення оптимальності їх використання.

Актуальність: рельєф сприймається як одне з основних і провідних факторів, що в значній мірі впливають на перебіг різних природних процесів. Геоморфологічні умови рельєфу впливають на розвиток ландшафтно-геофізичних процесів, які контролюють розподіл потоків речовини і енергії, розвиток ерозійних процесів. Методи інтерполяції знаходять все більш широке застосування при моделюванні рельєфу земної поверхні, мають практичну цінність для прогнозного ґрунтового картографування, картографування і оцінки ерозії ґрунтів, геоморфологічного районування, оцінки сільськогосподарських земель відповідно до агроекологічних вимог культур, в геоморфометрії, а також в топографо-геодезичних вишукуваннях.

Крім того, розпочати проектування неможливо без точних відомостей про територію майбутньої забудови. Для детального аналізу поверхні рельєфу та об'єктів розробки масштабних проектів застосовується цифрова модель рельєфу (ЦМР). Фактично, ЦМР - зображення планових координат і висот конкретної ділянки місцевості, що має математичне уявлення. З її допомогою проектні організації аналізують поверхню рельєфу, проводять моніторинг стану території та розташованих на ній об'єктів, контролюють обсяг робіт, що проводяться, вирішують інші завдання в рамках аналітичних проектних завдань.

Об'єкт дослідження: цифрова модель рельєфу з результатів лазерного сканування та БПЛА знімання.

Предмет дослідження: методи класифікації хмари точок.

Мета і завдання: дослідження методики створення ЦМР з результатів лазерного сканування та БПЛА знімання та отримання точних моделей.

Матеріал дослідження: дані лідарної БПЛА зйомки, наземного лазерного сканування та БПЛА знімання в районі міста.

Практичне значення полягає в тому, що його результати та рекомендації можуть бути використані при створенні поверхонь рельєфу по даним сучасних методів збору геопросторової інформації.

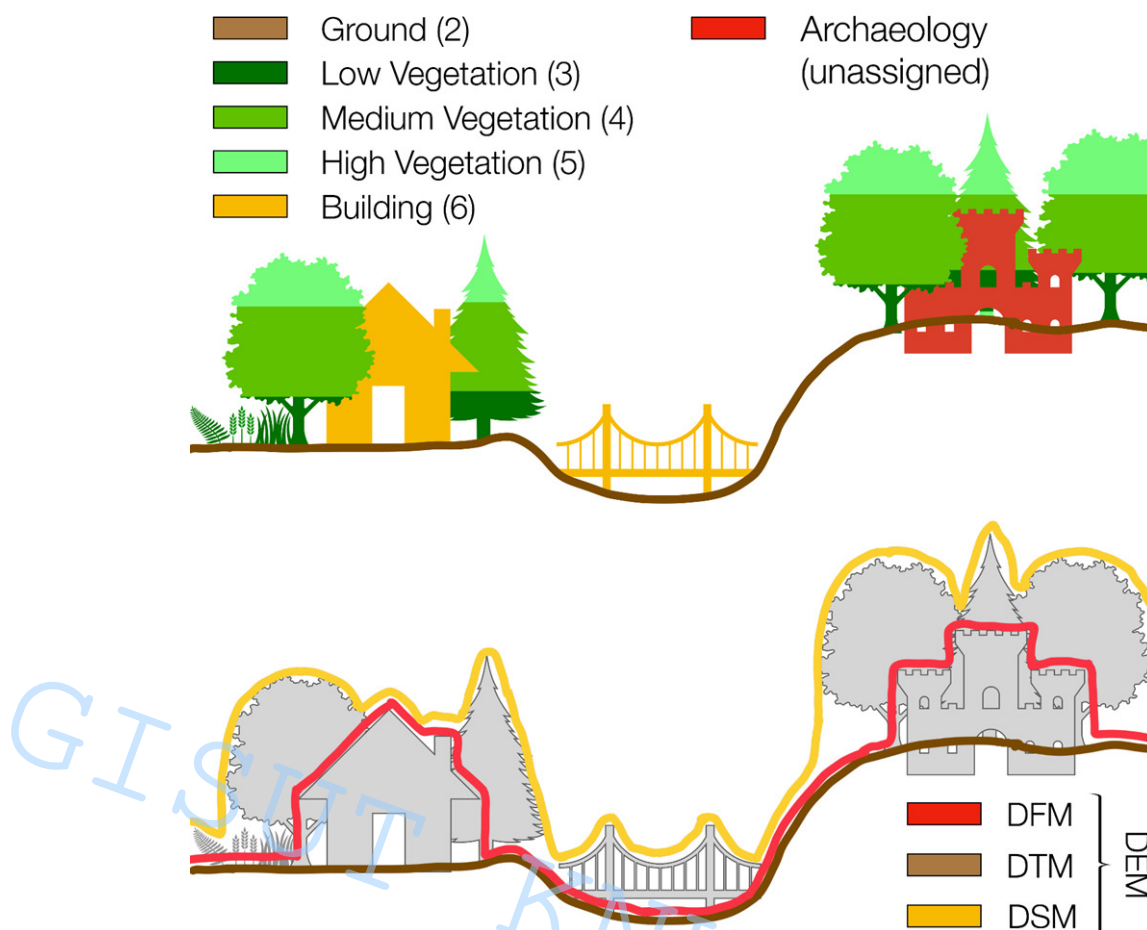
РОЗДІЛ 1. ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА БПЛА ЗНІМАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦМР

1.1 Аналіз методів створення ЦМР

Сьогодні тривимірне подання рельєфу засобами сучасних геоінформаційних технологій (ГІТ) є одним із напрямків у геоінформатиці при ситуаційному моделюванні (тренажери, командні навчання тощо), аналізі проектів і рішень (дорожнє будівництво та архітектура), розвитку транспортної й інженерної інфраструктури, у промисловості і сільському господарстві, моніторингу надзвичайних ситуацій, у моделюванні родовищ корисних копалин, як засіб найбільш ефективної просторової організації різночасових даних, для виконання аналітичних розрахунків і як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень, який дуже швидко розвивається. Оперування тривимірними просторовими даними є необхідним у геології, архітектурі, містобудівництві тощо. Велике значення ЦМР відіграють у задачах розрахунку режимів роботи інженерних мереж, аераційної обстановки, визначення забруднення територій, прогнозування затоплення територій тощо. Ці задачі потребують як визначення висот точок місцевості, так і побудови на поверхні досліджуваної ділянки території спеціальних розрахункових елементів для реалізації алгоритмів обчислювальної гідроаеромеханіки

Сьогодні існує певна термінологічна неоднозначність в англійських назвах продукції, що містить висотне подання земної поверхні, зокрема за цифровими моделями поверхні (ЦМП) та цифровими моделями рельєфу (ЦМР). Англійськими аналогами понять ЦМП та ЦМР прийнято вважати DSM (Digital Surface Model) та DTM (Digital Terrain Model).

DSM – цифрова модель місцевості (ЦММ), що відображає природний рельєф місцевості з рослинністю та різноманітними штучними перешкодами (будинками, деревами тощо), також відредаговані на моделі водні об'єкти, присвоєні їм однакові значення висоти тощо (рис. 1).



DTM – точного визначення для цієї моделі не існує, але часто трактується як аналогія ЦМР. DEM – цифрова модель рельєфу (ЦМР), що відображає природний рельєф місцевості. Перша модель включає в себе висоти всіх точок на земній поверхні, а друга – висоти рельєфу або, як доповнення, висоти окремих об'єктів місцевості. Одночасно і перша, і друга моделі є DEM (Digital Elevation Model).

Крім того, на думку деяких авторів, наприклад [3], термін «цифрова модель» взагалі є калькою англійського digital model і не є дуже вдалим, оскільки не відображує реалії моделювання. Цікаво, що в болгарській науковій літературі використовується термін «чисельна модель рельєфу», замість нашого «цифрова модель рельєфу» і англійського digital elevation model. Такий переклад вдало передає зміст, хоча й викликає певні асоціації з деякими термінами прикладної математики (чисельний аналіз, чисельні методи тощо). Однак, незважаючи на це, термін «цифрові моделі» широко вживається в науковій літературі, тому

недоцільно від нього відмовлятися. Оскільки рівень вимог щодо точності цифрового опису рельєфу, як системоутворюючого фактора місцевості, багато в чому визначається типом наукової або інженерно-технологічної задачі, методами її розв'язання, вартістю, наявним програмним забезпеченням, то перед споживачем стоїть завдання вибору джерел даних, які багато в чому визначають розрізнення моделі й алгоритмами створення ЦМР.

Для створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) існують різні методи, які базуються на різних джерелах даних та алгоритмах обробки. Основні методи створення ЦМР можна поділити на такі групи:

- Методи, що використовують топографічні карти або плани як основне джерело даних. Ці методи полягають у векторизації ісоконтурів, точок та лінійних елементів рельєфу, що зображені на картах, та їх подальшій інтерполяції для отримання ЦМР у вигляді регулярної або нерегулярної сітки. Прикладом такого методу є технологія створення ЦМР за архівними топографічними планами, що була застосована для аналізу змін рельєфу Бабиного Яру за різні роки [1].
- Методи, що використовують аерофотознімання або супутникові зображення як основне джерело даних. Ці методи полягають у використанні стереоскопічних пар знімків, з яких можна визначити висоту кожної точки на поверхні за допомогою фотограмметричних або кореляційних методів. Прикладом такого методу є аерофотознімання за допомогою безпілотників, що дозволяє отримати високоякісні та детальні знімки рельєфу.
- Методи, що використовують дистанційне зондування або космічну зйомку як основне джерело даних. Ці методи полягають у використанні радарних, лазерних або оптичних сенсорів, що вимірюють відстань до поверхні за допомогою відбитих сигналів. Прикладом такого методу є супутникова місія SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), що здійснила глобальне сканування рельєфу Землі за допомогою радару.

Усі ці методи мають свої переваги та недоліки, які залежать від точності, деталізації, охоплення, вартості та доступності даних. Вибір методу створення ЦМР залежить від цілей та задач дослідження, а також від наявності та якості даних. Для аналізу рельєфу в ГІС можна використовувати різні ЦМР, створені за різними методами, та порівнювати їх між собою. Також можна використовувати різні алгоритми інтерполяції та екстраполяції для побудови ЦМР з одних і тих самих даних, що також може впливати на результати аналізу.

GISUT KNUCA 2023

1.2 Аналіз публікацій щодо використання даних БПЛА знімання та лазерного сканування для отримання ЦМР

Автори дослідження [2] використовували безпілотні літальні апарати (UAV) для створення детальних карт невеликих річкових заплав на високому просторовому роздільній здатності. Вони продемонстрували цю технологію, використовуючи обробку структури з руху (SfM) над невеликою річковою заплавою в окрузі Говард (штат Меріленд, США). Оцінка отриманої моделі місцевості з голим ґрунтом за допомогою сучасного LiDAR показала незначне ухилення 1,6 см та середньоквадратичне відхилення (RMSD) 39 см.

Автори дослідження [3] представили CRBeDaSet - новий набір даних для оцінки технік моделювання та реконструкції 3D-об'єктів на близькій відстані. Об'єктом тестування є будівля середнього розміру. Набір даних містить: геодезичну просторову контрольну мережу (12 стабілізованих земних точок, визначених за допомогою ітеративного багатооб'єктного параметричного регулювання) та фотограмметричну мережу (32 штучно сигналізовані та 18 визначених природних контрольних точок), виміряних за допомогою тотальної станції Leica TS30 та 36 наземних, переважно конвергентних фотографій, отриманих з підвищених точок зйомки неметричною цифровою дзеркальною камерою Nikon D5100 (приблизна відстань вибірки ґрунту 3 мм), складні результати регулювання блоку з одночасною калібруванням камери, виконані в пакеті програмного забезпечення Pictran, та кольорові хмари точок (приблизно 250 мільйонів точок) з наземного лазерного сканування, отримані за допомогою Leica ScanStation C10 та оброблені в програмному забезпеченні Leica Cyclone™ SCAN, які були очищені від шуму, відфільтровані та класифіковані за стандартом LoD3 (приблизно 62 мільйони точок)

Стаття [4] присвячена аналізу якості ЦМР з неметричної цифрової камери на БПЛА у порівнянні з ЦМР від LiDAR, що відповідає тому ж географічному простору, що охоплює 4 км² у провінції Артеміда, Куба. Ця територія знаходиться в рамках містобудування, де необхідно знати топографічні характеристики, щоб проаналізувати поведінку гідрологів і вибрати найкраще

місце для будівництва доріг, будівництва тощо.

В роботі [5] автори дослідження використовували маленький безпілотний літальний апарат (UAV) з позиціонуванням GNSS класу обстеження для створення хмари точок для топографічного картографування та 3D-реконструкції. Метою цього дослідження було оцінити точність хмари точок, отриманої з допомогою зображень UAV, порівнюючи її з хмарою точок, згенерованою наземним лазерним скануванням (TLS). Зображення були зібрані на площі 320м на 320м з хвилястим рельєфом, що містить 80 контрольних точок. Було використано фіксовану платформу SenseFly eBee Plus з позиціонуванням РРК з фокусною відстанню 10,6 мм та 20 МП цифровою камерою для польоту над областю¹. Було використано комерційне програмне забезпечення на основі комп'ютерного зору Pix4Dmapper для обробки фотограмметричного блоку, обмеженого 5 GCP, отримуючи RMSE на рівні сантиметрів на основі решти 75 контрольних точок. На основі результатів автоматичної аеротриангуляції були згенеровані хмара точок та цифрова модель поверхні (DSM) (2,5 см/піксель), і була оцінена їх точність¹. Було спостережено ухилення менше 1 пікселя в висотах з DSM UAV на контрольних точках. Зареєстрований TLS-скан склав хмару точок тієї ж області з спостережуваною горизонтальною середньоквадратичною помилкою (RMSE) 0,006 м та незначною вертикальною RMSE. Були зроблені порівняння між підібраними площинами екстрагованих особливостей даху 2 будівель та профілем центральної лінії дороги в обох хмарах точок UAV та TLS. Порівняння показали середнє ухилення +8 см з хмарою точок UAV.

Роботу [6] присвячено використанню безпілотних літальних апаратів з обробкою зображень за допомогою структури з руху (SfM) для створення точних 3D-моделей високогірних ландшафтів¹. Вони досліджували вплив кута зйомки камери, перекриття та конфігурації зйомки на точність і точність відтвореного рельєфу. Результати показали, що кут зйомки має значний вплив на точність і точність при зйомці з одним кутом камери в топографічно складних сценах. Вони також підтвердили попередні висновки, що додавання косих зображень до

робочого процесу UAV–SfM систематично покращує просторову точність і точність, зменшує прогалини в даних і систематичні помилки в кінцевій хмарі точок¹. Незначні відмінності між різними кутами камери та зразками зйомки свідчать про те, що вище перекриття та вищі кутові кути камери (20–35°) збільшують точність і точність майже на 50% в порівнянні з блоками зображень тільки з надиром.

В роботі [7] проведено дослідження з метою збору даних зображень і тривимірних наземних контрольних точок в районі міста Тайчжун за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА), загальної камери та кінематики в реальному часі з точністю позиціонування до сантиметра. Досліджувана територія - це екологічний парк з низьким рельєфом, побудована цифрова модель поверхні та ортофотоплани з високою роздільною здатністю за допомогою Agisoft PhotoScan. Дослідження проведено з використанням наземних опорних точок та без них. Згідно з оцінкою відхилення контрольних точок, модель без наземних опорних точок мала середню квадратичну помилку 40 сантиметрів, а похибка висоти - в межах 1 метра. Повітряний RTK-підхід без наземних опорних точок забезпечив сантиметрову точність. У випадку моделі з наземними опорними точками, точність координат x, y, z зросла на 54,62%, 49,07% та 87,74%, а точність висоти покращилася найбільше.

Авторами публікації [8] розглядається використання безпілотних літальних апаратів (UASs) та безпілотних повітряних апаратів (UAVs) для створення тривимірних хмар точок та цифрових моделей поверхні за допомогою програм обробки зображень. Автори аналізують точність тривимірних хмар точок та цифрових моделей поверхні на трьох дослідних майданчиках з різною площею в залежності від кількості контрольних точок (GCPs). Результати показали, що оптимальна кількість GCPs складає 12 для малих і середніх майданчиків (7 та 39 га) та 18 для великих майданчиків (342 га) на основі загальної точності.

У статті [9] розглядається використання безпілотних літальних апаратів з оптичною камерою для топографічних обстежень. Ці недорогі безпілотні

літальні апарати можуть надавати корисну інформацію для тривимірної реконструкції навіть якщо вони обладнані навігаційною системою низької якості. Для забезпечення високоякісних топографічних моделей потрібно ретельно розглянути режим польоту та правильно розподілити контрольні точки на землі. У цьому випадку комерційний безпілотний літальний апарат був використаний для моніторингу невеликої земляної дамби за допомогою різних комбінацій конфігурацій польоту та за допомогою змінної кількості контрольних точок на землі. Результати показують, що оптимізація вибору та комбінації планів польоту може зменшити відносну похибку 3D-моделі до двох метрів без необхідності включення контрольних точок на землі. Однак використання контрольних точок на землі значно покращує якість топографічного обстеження, зменшуючи похибку до кількох сантиметрів. Комбіноване використання зображень, отриманих з двох польотів, одне з камерою, встановленою на надірі, а друге з кутом 20° , виявилось корисним для підвищення загальної точності 3D-моделі та особливо вертикальної точності

У цьому дослідженні [10] представлені результати оцінки точності хмари місцевості в лісових умовах з різним ступенем деревного покриву. Оскільки хмари точок були засновані на зображеннях, отриманих за допомогою БПЛА, укріття має вирішальне значення для можливості дістатися до місцевості. Це важлива відмінність при порівнянні точкових хмар на основі фотограмметрії та лазерного сканування. Досягнута горизонтальна точність була високою в тому випадку, якщо місцевість була успішно реконструйована, досягнувши субдециметрових значень. Вертикальні похибки менше 20 см дозволяють застосовувати хмари точок на базі БПЛА для різних завдань, пов'язаних з вертикальною структурою лісу, особливо визначення висот лісових насаджень та окремих дерев. Крім того, кількість наземних контрольних точок мала лише незначний вплив на отриману точність у представленому дослідженні. Початкова конфігурація чотирьох базових GCP мала значний вплив у деяких випадках, але без будь-яких правил, які надавали перевагу одній конфігурації над іншою. Можна припустити, що у випадках лісових ділянок з однаковою площею

(~1 га) та з використанням одного програмного забезпечення кількість наземних контрольних точок має лише другорядне значення. Однак кількість GCP, близька до технічного мінімуму (3-4), не може бути рекомендована, і результати повинні бути перевірені в більш широкому діапазоні умов. В цілому, точність точкових хмар на базі БПЛА була високою і може вважатися надійною для різних завдань щодо горизонтальних і вертикальних вимірювань в умовах лісу.

В роботі [11] розглянуто питання точності геореференційних цифрових моделей поверхні (DTM), отриманих зображеннями, знятими мікро-БПЛА та обробленими за допомогою структури з руху (SfM) фотограмметрії. Точність залежить від кількох факторів, включаючи дизайн польоту, якість камери, калібрування камери, алгоритми SfM та стратегію геореференції. У статті розглядається критична роль кількості та розташування контрольних точок землі (GCP) під час етапу геореференції. Для оцінки точності моделі використовувалися як контрольні точки, так і незалежні точки перевірки. Аналіз показує, наскільки точність зростає зі збільшенням кількості контрольних точок GCP, а також важливість рівномірного розподілу, наскільки точність переоцінюється, коли вона оцінюється лише за допомогою контрольних точок, а не незалежних точок перевірки, та як земна відстань від проекту пов'язана з максимальною точністю, яку можна досягти.

1.3. Поняття цифрової моделі рельєфу

Цифрове моделювання рельєфу – одна з важливих моделей функцій геоінформаційних систем. ЦМР включає дві групи операцій, перша з яких створює модель рельєфу, друга – забезпечує її використання.

Під цифровою моделлю рельєфу розуміють засіб цифрового представлення тривимірних просторових об'єктів (поверхні або рельєфів) у вигляді тривимірних даних, що утворюють безліч висотних позначок (позначок глибин) та інших значень аплікату (координати Z) у вузлах регулярної чи нерегулярної мережі чи сукупність записів горизонталей (ізогіпс, ізобат) чи інших ізоліній [19].

Перші експерименти зі створення ЦМР ставляться до раних етапів розвитку геоінформатики та автоматизованої картографії першої половини 60-х рр. ХХ ст. З того часу розроблено методи та алгоритми вирішення різних завдань, створені програмні засоби моделювання, великі, у тому числі національні та глобальні, масиви даних про рельєф, нагромаджено досвід вирішення за їх допомогою різноманітних наукових наук та прикладних завдань.

Кожну точку поверхні Землі неможливо відобразити у моделі. Тому використовують цифрові моделі рельєфу, які передають окремі точки. Набір цих точок дозволяє відновлювати поверхню засобами комп'ютерного моделювання. В англійській літературі використовується спеціальний термін *digital elevation model (DEM)*.

Під цифровою моделлю рельєфу розуміється впорядкований в просторі чисельний набір дискретних висотних точок. У картографічному словнику термін «цифрова модель рельєфу» трактується так: «тривимірна цифрова модель, що містить інформацію про координати та висоти (глибини) земного рельєфу або поверхні інших небесних тіл. Може бути представлена відмітками мережі (матриця висот), нерегулярної триангуляційної мережі або як запис висот ізоліній (горизонталей, ізобат)».

Спосіб моделювання рельєфу місцевості залежатиме від його характеру, масштабу моделі, необхідної точності подання рельєфу, яким вирішуватимуться прикладні завдання.

Найбільш поширені способи цифрового уявлення рельєфу мають вигляд:
– векторних ліній (горизонталів або інших ізоліній з рівним або нерівним кроком);

– регулярної матриці (регулярна або матрична модель) висот земної поверхні (подання на регулярній сітці квадратів, прямокутників або трикутників, коли в її вузлах задані значення висоти); далі – регулярна матриця висот чи регулярна модель.

В англійській мові регулярна сітка квадратів називається GRID, тому в російськомовній літературі часто використовують слово "грид". За способом обчислення значення рівнів поля між вузлами сітки розрізняють ґраткові та комірчасті сітки. У першій з них такі значення інтерполюються за значеннями висот у сусідніх точках, друга модель розглядає точки як центри осередків із постійним значенням позначки висоти;

– нерегулярної, так званої TIN-моделі (TIN – Triangulated Irregular Network), що включає деяку сукупність точок з висотними відмітками, якими проведена тріангуляція з урахуванням ліній розриву безперервності (далі – нерегулярна тріангуляційна мережа) [15,12,14].

Найважливішим недоліком уявлення рельєфу у вигляді регулярної матриці є невідповідність координатної сітки (точок матриці) структурі рельєфу. Тут передбачається рівнозначність всіх точок цифрової моделі (іншими словами, передбачається безперервність і плавність рельєфу) і допускається можливість ігнорувати особливі, найбільш значущі точки рельєфу, що знаходяться на лініях тальвегів та вододілів, перегибах схилів. У зв'язку з цим важливим є вибір оптимального кроку сітки, оскільки з його збільшенням зростають похибки цифрової моделі, і з зменшенням різко зростають обсяги даних.

За схемами підготовки та організації вихідних даних ЦМР поділяються на такі:

– моделі з розташуванням опорних точок у вузлах регулярних сіток за квадратами, прямокутниками (рис. 1.3.1, а, б), за трикутниками, горизонталями (рис. 1.3.1, в, г). На рис. 1.3.2, 1.3.3 наведено приклади зображення ЦМР у вигляді нерегулярної триангуляційної та регулярної моделей;

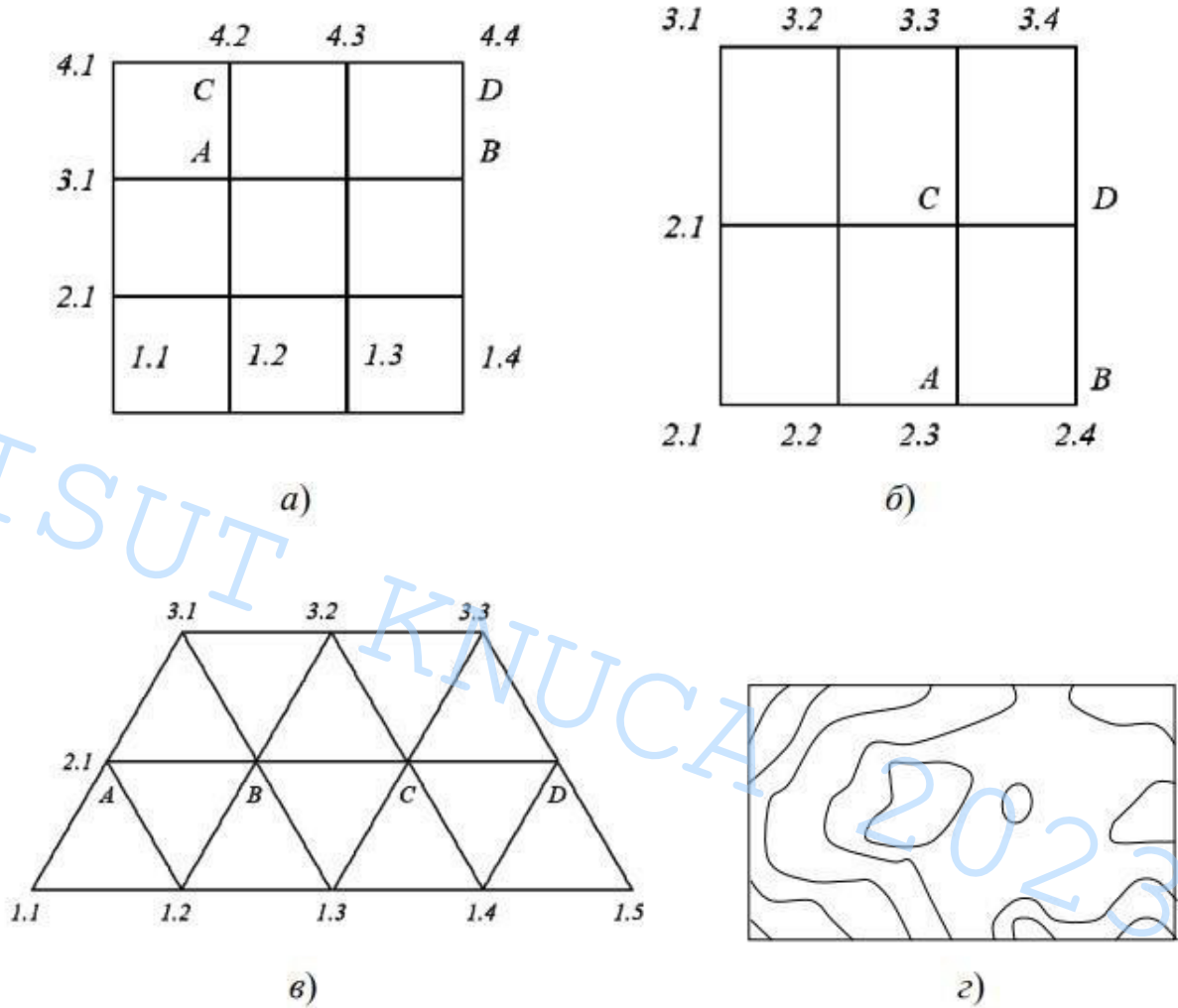
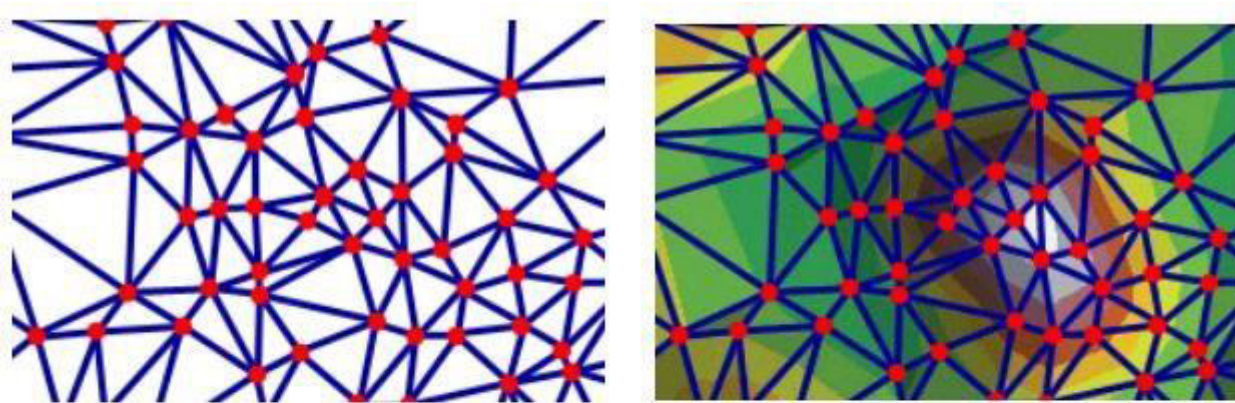


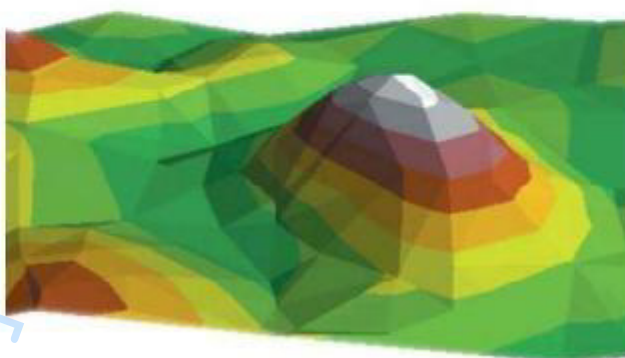
Рис. 1.3.1 Схеми організації вихідних даних для ЦМР

а) по квадратам; б) по прямокутникам; в) по трикутникам; г) по горизонталям



a)

б)



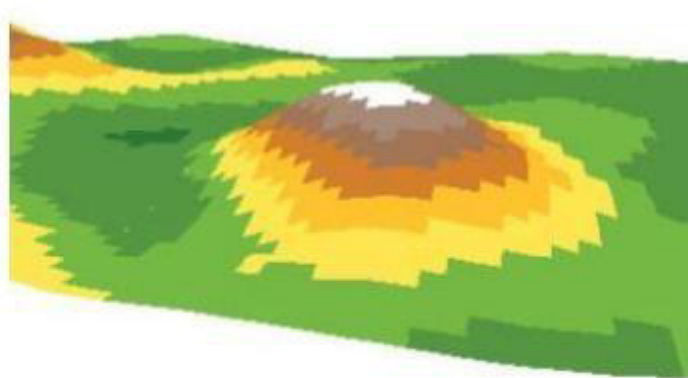
в)

Рис. 1.3.2 Тривимірне відображення триангуляційної моделі рельєфу:

а) триангуляція; б) триангуляційна модель рельєфу; в) тривимірне відображення рельєфу



a)



б)

Рис.1.3.3 Тривимірне відображення регулярної моделі рельєфу

а) регулярна мережа; б) тривимірне відображення рельєфу

- напіврегулярні моделі у вигляді систем взаємопаралельних профілів;
- моделі з опорними точками по поперечниках до заданих ліній;
- моделі з набором точок по горизонталі з рівним кроком (рис. 1.3.1, г);
- моделі з випадковим у геометричному сенсі розташуванням опорних точок на характерних перегибах рельєфу та екстремальних місцях.

Разом з тим, регулярні сітки дозволяють використовувати при їх обробці прості алгоритми інтерполяції, забезпечують простоту генерації різних уявлень рельєфу у вигляді зображень або горизонталей, а також при розрахунку похідних параметрів (наприклад, морфометричних).

Модель у вигляді нерегулярної триангуляційної мережі дає найкраще подання рельєфу у разі сильнопересіченої місцевості, але цю модель важко оновлювати. Кожна зміна рельєфу території, що моделюється, зазвичай тягне за собою необхідність заново розвивати всю мережу. Інший недолік нерегулярної триангуляційної мережі – надмірна складність створення рівнів деталізації. Внаслідок цього візуалізація ЦМР у режимі реального часу на основі нерегулярної триангуляційної мережі ускладнена.

При нерегулярному способі завдання цифрової моделі рельєфу виникає завдання інтерполяції її поверхні, яка представляється як функція двох змінних x , y і перерахунку в регулярний спосіб подання.

Найбільш використовуваними методами інтерполяції у ГІС та інших системах геомодельювання є:

- інтерполяція на основі триангуляції Делоне;
- кригінг;
- середньозважена (середньогармонійна) інтерполяція – метод Шепард; - поліноміальне та шматково-поліноміальне згладжування [3,5,12,20].

Метод моделювання на основі триангуляції полягає в наступному: у заданій області будуються трикутники, що не перекривають один одного, вершинами яких є опорні точки. У кожному трикутнику поверхність є або

лінійною функцією, або поліноміальною поверхнею, коефіцієнти якої визначаються за значеннями та приватними похідними у вершинах трикутника.

Підвищуючи ступінь поліномів, можна досягти заданого ступеня гладкості шматково-поліноміальної поверхні. У переважній більшості випадків використовується метод, який називається «триангуляція Делоне».

Основна проблема при побудові ЦМР полягає в тому, що реальна поверхня нерегулярна, тобто має розриви. Математичні моделі зазвичай описують гладку, регулярну поверхню. Тому часто цифрову модель рельєфу будують із сукупностей різних математичних моделей, що стикаються у певних точках.

Одна з проблем моделювання рельєфу – знаходження способу, який дозволяв би за мінімальної кількості точок моделі максимально інформативно відобразити вихідну поверхню. Підхід, що дає вирішення цієї проблеми, - метод Делоне. Метод спрощено можна звести до знаходження системи дискретних точок, що заповнюють певний простір.

Порівняння методів інтерполяції показує, що моделювання на основі триангуляції Делоне є найшвидшим, ще на попередній стадії створення цифрової моделі дозволяє швидко виявляти помилки даних, оцінювати поширення показника.

Метод кригінгу в більшості випадків дає хороші результати, навіть коли щільність опорних точок невелика. Однак за деякого розташування опорних точок з відповідними значеннями в них можлива поява небажаних осциляцій (різкі піки або западини). Цей недолік можна виправити шляхом застосування не інтерполяційного, а кригінгу, що «згладжує».

До переваг методу узагальненої середньозваженої інтерполяції можна віднести те, що він є локальним, тобто на значення моделюється функції та її похідних у будь-якій точці практично не впливають значення в опорних точках, далеко віддалених від неї. Цей метод добре використовувати, коли опорні точки розташовані досить щільно. Крім того, змінюючи вагову функцію та ступінь

полінома, можна в інтерактивному режимі підбирати модельну поверхню, найбільш прийнятну з погляду фахівця.

Насправді вихідний рельєф часто задається як ізолінії, що суттєво ускладнює аналіз рельєфу. Тому в ГІС, які працюють з тривимірним поданням, як правило, існують додатки, що забезпечують перетворення ізоліній на регулярну сітку або триангуляційну мережу. На першому етапі ізолінії перетворюються на нерегулярну мережу точок, значення рівнів яких відповідають рівням вихідних ізоліній, наприклад, шляхом перетворення вузлів ізоліній на точкові об'єкти або шляхом виявлення перетинів ізоліній з квадратною сіткою.

На другому етапі здійснюється відновлення регулярної поверхні за отриманими нерегулярними даними. Сучасні спеціалізовані програмні продукти дозволяють отримувати щільну цифрову модель поверхні автоматично в режимі за матеріалами аерофотозйомки, лазерної локації. Щільна цифрова модель поверхні є щільною хмарою точок, кожна з яких представлена трьома координатами. Точність такої моделі залежить від багатьох факторів, таких як якість вихідних фотографій, наявність та точність визначення координат центрів фотографування, координат точок планово-висотного обґрунтування [13, 16, 17].

1.3. Перспективи та проблеми при використанні лазерного сканування та БПЛА знімання для створення ЦМР

Можливі проблеми при використанні лазерного сканування для створення ЦМР:

1. Наявність надлишкової інформації. Лазерне сканування може генерувати надмірну інформацію, яку потрібно обробляти та фільтрувати, особливо для великих або складних територій. Пов'язано це з тим, що сучасні лазерні сканери дозволяють отримати дуже високу щільність точок, і така детальність зазвичай буває зайвою. Горизонталі, побудовані по поверхні у форматі TIN без якої-небудь обробки не відтворюють адекватно моделі.

2. Похибки класифікації. Найуживаніші алгоритми класифікації засновані на застосуванні ряду методів, які можна охарактеризувати, як геометричні. Використовуючи їх, в клас «земля» можуть потрапити точки, відбиті від низької рослинності, які складно навіть візуально відрізнити від точок землі під час аналізу інформації з ортофотопланом і поздовжніми профілями, побудованими за ТЛВ.

3. Похибки лазерного сканування. Питання про точність лазерного сканування досить широке, оскільки на нього впливає значна кількість чинників: динамічний характер знімання (сканування здійснюється з повітряного засобу пересування), похибки визначених геодезичних координат точок, похибки перерахунку в різні системи координат і висот тощо. Для створення ЦМР, придатної до використання для побудови на її основі горизонталей, в САПР проектувальниками у разі потреби слід застосовувати алгоритми оптимізації та усунення шумів. При цьому необхідно дотримуватись вимог керівних документів, які допускають коректування отриманих даних в достатньо вузькому діапазоні, зокрема для великомасштабної картографічної продукції.

4. Зволоженість об'єктів може погіршити точність сканування.

5. Наявність скляних структури з високим ступенем відбиваючої властивості (поля сонячних панелей, металевий дах)

6. Рухливі об'єкти в полі зору зашумлюють хмару точок (люди, транспорт).

7. Наявність розривів в хмарі точок внаслідок наявності перешкод під час знімання тіней).

Можливі проблеми при використанні БПЛА для створення ЦМР

1. Проблема отримання даних на великих відбиваючих поверхнях (водна гладь, дахи споруд і тп.)
2. Наявність різної освітленості об'єкту знімання ускладнює задачу зшивання знімків та визначення елементів взаємного орієнтування.
3. Необхідність використання наземних маркерів в залежності від очікуваної точності отриманої фотограмметричної моделі.
4. Відсутність точок поверхні під об'єктами рослинності (крони дерев, кущі, камиш, тощо)

GISUT KNUCA 2023

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ВИДІЛЕННЯ ЦМР

2.1 Характерні особливості хмари точок лазерного сканування та БПЛА знімання.

Операції, проведені в інтерактивному режимі над хмарою включають в себе різні задачі до них відноситься: класифікація, відновлення поверхні об'єкта, розпізнавання об'єкта, та інші.

Ці задачі основані на наступних принципах:

- Принцип близькості. Під час перегляду об'єкта, його потрібно віднести в відповідний клас, до якого він належить. Об'єкт попадає в клас на який він найбільше схожий.
- Принцип розділення. Якщо розглядається питання класифікації, то це означає, що потрібно знайти поверхню, яка відділяє об'єкт одного класу від іншого.

З цього випливає, класифікація – це метод, використаний для набору даних і розділення їх на основі відповідних правил класифікації або зв'язку між об'єктами. Програма в межах даної операції мусить заздалегідь вибраним і заданим класам розділити об'єкти на окремі групи.

Варто зазначити, що термін розпізнавання об'єктів в контексті лазерного сканування можна зв'язати з задачею класифікації хмари точок. Задача розпізнавання заснована на методах класифікації об'єктів, які характеризуються кінцевим набором деяких властивостей. В той час класифікація точок в хмарі представляє собою співставлення деякій групі точок відповідного класу класифікації, визначаючий тип об'єкта, якому можуть належати дані точки [14].

Під час вивчення літератури було відмічено ряд програмних продуктів, які найкраще підходять для обробки даних лазерного сканування.

2.2 Аналіз засобів для класифікації хмари точок

2.2.1. Алгоритми класифікації хмари точок

Якщо розглядати обробку 3D даних класичними методами машинного навчання, то можна дізнатися, що в цьому напрямі зроблена значуща робота, і для всіх, хто хоче познайомитися з прикладами таких алгоритмів, варто звернути увагу на оглядову статтю [21], зокрема в ній розглядаються різні етапи препроцесингу та способи вилучення інформаційних ознак із коваріаційної матриці дисперсії найближчих сусідів для кожної точки.

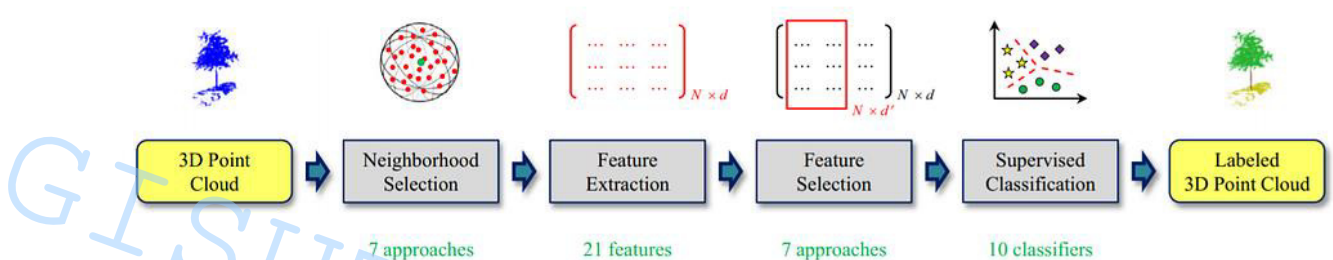


Рис. 2.2.1. Процедура вилучення признаков і класифікація для хмари точок

Оскільки задача класифікації 3D-об'єктів досить складна, а вилучення інформативних ознак з 3D-даних є вкрай нетривіальним завданням, використання глибоких нейронних мереж, які автоматично витягують ознаки, видається більш перспективним як алгоритм класифікації. На даний момент існуючі глибокі архітектури дозволяють досягати хороших результатів в різних завданнях обробки 3D даних, починаючи від класифікації одиничних об'єктів і закінчуючи генерацією нових об'єктів на основі їх ескізів. Можна провести аналогію з успіхами, які були досягнуті в обробці 2D-зображень і відео при масовому поширенні нейронних мереж. З іншого боку, більш традиційні методи також залишаються корисними при вирішенні деяких проблем.

Архітектури глибокого навчання, призначені для обробки хмар точок, можна розділити на дві великі групи: прямі та непрямі. Прямі методи безпосередньо використовують хмару точок як вхідні дані для нейронної мережі, а для використання непрямих методів необхідно спочатку перевести хмару точок в іншу форму представлення даних.

Дослідники в області **3D машинного навчання** запропонували досить багато ідей (див. огляди [22,23]), заснованих на різних основних принципах і формах представлення об'єктів, для вирішення проблеми класифікації об'єктів у вигляді хмари точок. Наприклад, це були методи з використанням послідовності 2D-зображень (multi view methods), до яких застосовувалися згорткові нейронні мережі (CNN), після чого результат розмітки проектувався назад у тривимірний простір.

Інший підхід полягає у використанні вокселів і застосуванні до них операторів згортки або використанні рекурентних нейронних мереж (RNN). Однак, здається, найкращим підходом є використання самої хмари точок як вхідних даних для нейронної мережі (так званий прямиий підхід).



Рис. 2.2.2 Таксономія моделей глибокого навчання для сегментації семантичної хмари точок.

Непрямий метод MVCNN [24]

Вхідні дані: пара зображень: RGB і карта глибини.

Вихід: Розмітка семантичного зображення + хмара точок з маркуванням класу.

Функції:

- Основна ідея полягає в тому, щоб розмістити камери на сцені з різних ракурсів, зробити знімки RGB-D (рис. 23), обробити їх згортковими нейронними мережами для семантичної розмітки піксельно, а потім зробити зворотне відображення на тривимірний простір.

- Мережа більше призначена для класифікації та кластеризації однозв'язаних моделей і погано підходить для сцен.
- Краще працює на полігональних моделях, ніж на хмарах точок.
- У цій статті ви можете знайти алгоритм налаштування камер у сцені для отримання двовимірних зрізів.
- У примітці згадуються дескриптори SOTA для векторних зображень Фішера.
- Можлива адаптація мережі під інші завдання, наприклад, розпізнавання двовимірних ескізів тривимірних об'єктів (3D візуальний пошук на основі ескізного запиту).

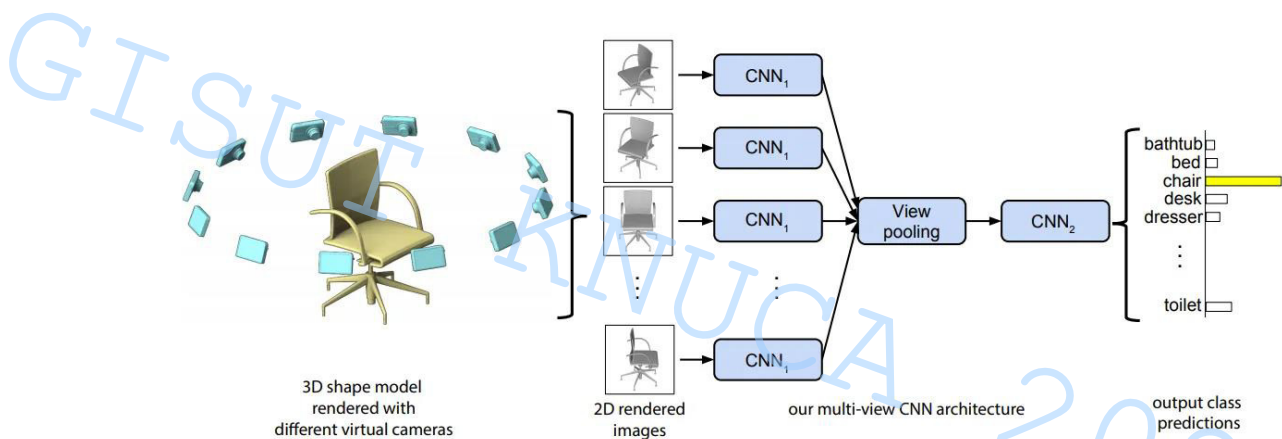


Рис. 2.2.3. Схема мережі MVCNN

Непрямий метод SnapNet [25]

Вхідні дані: пара зображень: RGB та зображення глибини.

Вихід: Розмітка семантичного зображення + хмара точок з маркуванням класу.

Функції:

- У статті запропоновано підхід, який використовує генерацію ряду пар зображень RGB-D — проєкцій під різними кутами для початкової хмари точок. Попередньо будується полігональна модель ділянок. Семантична розмітка відбувається для плоских зображень (рис. 4).

- Головною особливістю є техніка проєктування з 2D в 3D після семантичної сегментації зображень.

- Досліджено різні підходи до семантичної сегментації 2D, зокрема, розглянуто питання об'єднання даних RGB-D в одну або кілька мереж злиття.

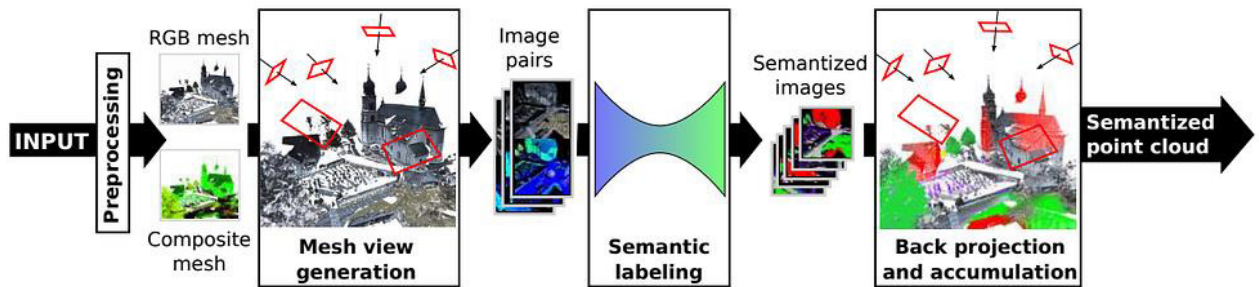


Рис.2.2.4 Схема мережі SnapNet

Непрямий метод SnapNet-R [26]

Вхідні дані: пара зображень: RGB та зображення глибини.

Вихід: Розмітка семантичного зображення + хмара точок з маркуванням класу.

Функції:

- Мережа використовує підхід SnapNet, але має покращений алгоритм розміщення камер на місці події та генерації зображень (рис. 5).

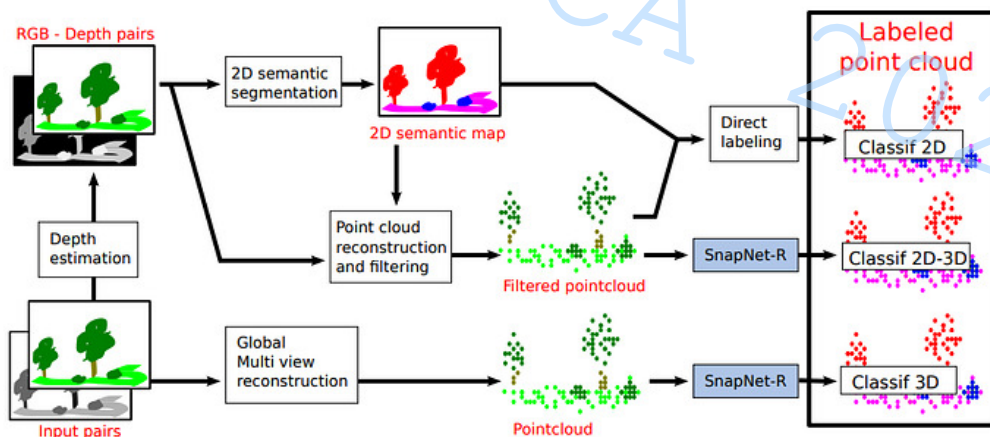


Рис. 2.2.5. Схема мережі SnapNet-R

Для того, щоб аналізувати великі сцени, що складаються з безлічі різних об'єктів, необхідно вміти виділяти інформативні ознаки, пов'язані з усією сценою в цілому, і особливості, пов'язані з конкретними об'єктами і їх частинами зокрема. Щоб не шукати універсальну модель для вилучення всіх ознак відразу, використовується підхід синтезу декількох моделей, кожна з яких спрямована на виявлення певної категорії ознак.

Метод злиття ознак PointSIFT [27]

Вхідні дані: хмара точок.

Вихідні дані: оцінювання членства в класі та хмара точок Sharded.

Функції:

- Модифікація PointNet з попереднім підбором тривимірних особливостей SIFT.
- Його перевіряли на сценах з великою кількістю об'єктів

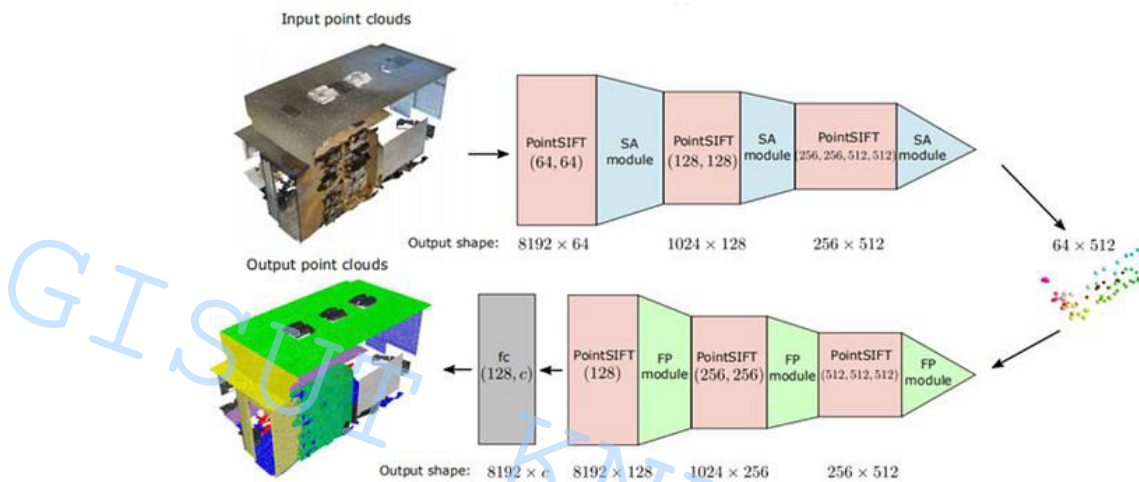


Рис. 2.2.6. Мережева архітектура PointSIFT

Якщо є можливість реконструювати інформацію про поверхню об'єкта (наприклад, у випадках, коли ми працюємо з полігональною моделлю), то ми можемо застосувати специфічні властивості просторових графів для вирішення задачі класифікації та сегментації. Наступна група методів заснована на використанні операцій згортки над графами, і всі моделі так чи інакше засновані на архітектурі згорткових нейронних мереж графа (GCNN).

Спосіб сплавлення DGCNN [28]

Вхідні дані: хмара точок.

Вихідні дані: оцінювання членства в класі та хмара точок Sharded.

Функції:

- На відміну від базового GCNN, в даній архітектурі граф динамічно перебудовується в процесі застосування після проходження інформації через кожен наступний шар мережі (рис. 18).

- У прихованих шарах в якості операторів використовуються спеціальні зв'язки країв, які дають можливість знаходити найближчих сусідів для кожної точки не тільки в первісному евклідовому просторі, але і в просторі прихованих об'єктів.
- Вихідна хмара точок перетворюється в канонічну форму за допомогою спеціальної мережі.

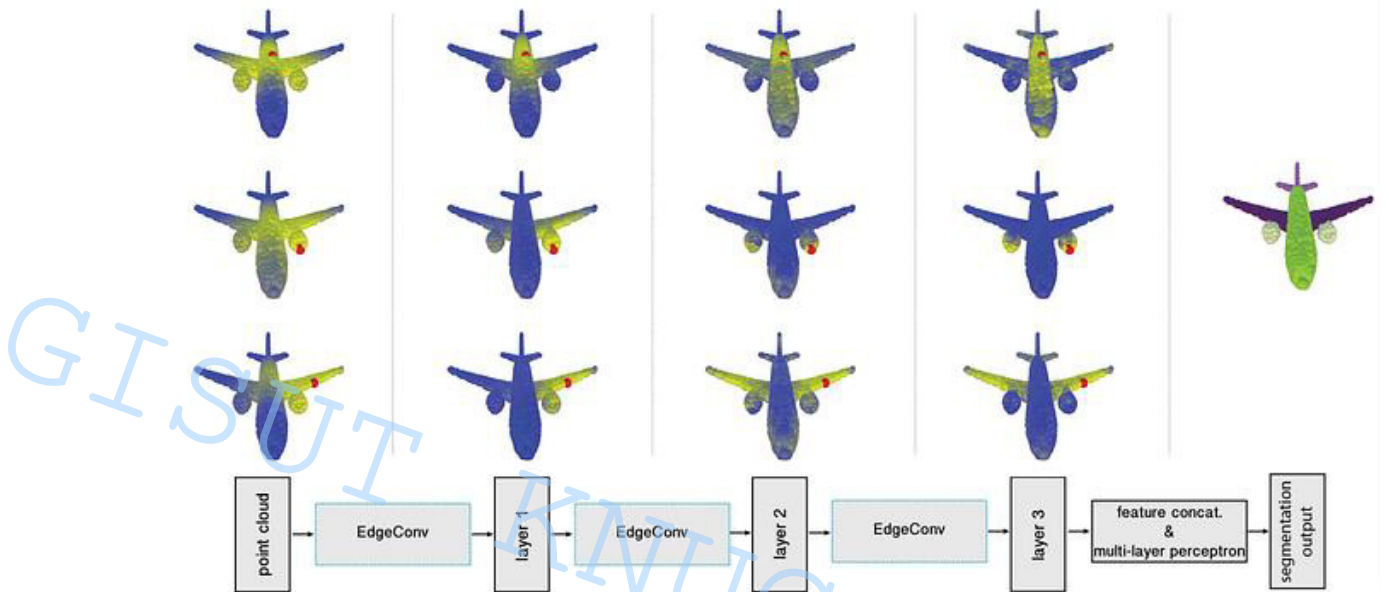


Рис. 2.2.7. Схема мережі DGCNN

2.2.2. Програмні комплекси для класифікації хмари точок

Інструменти класифікації хмари точок - це програми або алгоритми, що дозволяють розподілити точки хмари за різними критеріями, такими як висота, кут нахилу, інтенсивність, кольори тощо. Це може бути корисно для виділення певних об'єктів або поверхонь на хмарі точок, таких як рослинність, будівлі, дороги, річки тощо. Деякі приклади інструментів класифікації хмари точок:

CREDO 3D СКАН - це програмний продукт для оброблення даних лазерного сканування, що має функції класифікації хмари точок за стандартом ASPRS LAS. Користувач може використовувати базові або додаткові класифікаційні шари, а також редагувати їх вручну або автоматично.

Pix4mapper - це професійне програмне забезпечення, що використовує знімки для створення щільної хмари точок, цифрових моделей місцевості, 3D поверхонь і цифрових моделей рельєфу. Користувач може групувати точки хмари в класи об'єктів: рослинність, будівлі, штучні об'єкти і точки на землі, а також редагувати їх за допомогою класифікатора².

CloudCompare - це вільне програмне забезпечення, що дозволяє порівнювати, обробляти та візуалізувати 3D хмари точок та поверхні. Воно має різні алгоритми класифікації, такі як видалення шуму, виявлення нормалей, сегментація за геометрією або кольором, виявлення планарних областей тощо. Завдяки оновленням CloudCompare стало більш універсальним програмним забезпеченням для обробки хмар точок, включаючи безліч передових алгоритмів як: реєстрація, повторна вибірка, маніпуляції з кольоровим/нормальним/скалярним полем, статистичні обчислення, керування датчиками, інтерактивне або автоматичне націлювання, покращення візуалізації. В цій програмі є інструмент для класифікації хмари точок Сауро та виділення точок рельєфу CSF фільтр.

Agisoft Metashape Professional – це програма для фотограмметричної обробки цифрових зображень та генерації 3D просторових даних, які можуть бути використані у додатках ГІС, документуванні культурної спадщини та

виробництві візуальних ефектів, а також для непрямих вимірювань об'єктів різних масштабів. В ній реалізовано алгоритми класифікації хмари точок та виділення рельєфу з хмари точок.

Quick Terrain Modeler — програмний пакет для 3D-хмари точок і візуалізації ландшафту. Quick Terrain Modeler, розроблений для використання з LiDAR, але досить гнучкий, щоб використовувати інші джерела 3D-даних, забезпечує просте у використанні програмне забезпечення, яке дозволяє користувачам працювати зі значно більшою кількістю даних, відтворювати більші моделі, швидше аналізувати дані та експортувати різні продукти.

ContextCapture - продукт для створення 3D-моделей з високою роздільною здатністю на основі звичайних фотографій. Візуалізація та редагування хмар мільярдів точок, зміна їхньої класифікації, кольору та видалення точок. Редагування моделей реальності та цифрових моделей місцевості, що складаються із сотень мільйонів трикутників. Імпорт, ретушування та експорт моделей реальності у різні формати.

PDAL - це бібліотека для аналізу та маніпуляції з хмарами точок. Вона підтримує різні формати даних, такі як LAS, LAZ, E57, PCD, PLY тощо. Вона має різні фільтри для класифікації хмари точок, такі як видалення викидів, виявлення ґрунту, виявлення будівель, виявлення води тощо².

Point Cloud Library (PCL) - це велика бібліотека для обробки 3D хмар точок. Вона має багато модулів для різних завдань, таких як фільтрація, сегментація, реєстрація, відновлення поверхні, розпізнавання об'єктів, візуалізація тощо. Вона також має різні алгоритми класифікації, такі як SVM, Random Forests, K-means, Conditional Random Fields тощо.

2.3 Методика виділення та побудови ЦМР

2.3.1. Методика виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Agisoft Metashape

На першому етапі хмару точок потрібно відфільтрувати [28].

- 1) *Ручна фільтрація*. За допомогою інструментів виділення на панелі інструментів (рис. 21) виділити зайві точки в просторі моделі і видалити їх, натиснувши кнопку *Del* на клавіатурі.



Рис. 2.3.1 Інструменти виділення точок

- 2) *Фільтрація за кольором*. За допомогою меню *Tools – Dense cloud – Select points by color* можна виділити всі точки певного кольору (наприклад шумові точки від поверхні водойми синього кольору). Після чого видалити їх кнопкою *Del*.
- 3) *Фільтрація за достовірністю*. Якщо на етапі побудови щільної хмари точок виконувався розрахунок достовірності, то можна видалити з моделі точки з низькою достовірністю. Для відображення розрахованої достовірності точок необхідно на панелі інструментів обрати відповідний режим (рис. 22). Хмара точок розфарбується за шкалою від червоного до синього, залежно від кількості карт глибин у відповідності до шкали у нижній лівій частині.

Далі необхідно класифікувати землю на хмарі точок за допомогою меню *Tools – Dense cloud – Classify ground points*. У спливаючому вікні необхідно встановити такі параметри (підходять для більшості сценаріїв зйомки з БПЛА):

- **Максимальний кут нахилу** (Max angle) – 15° (стандартне значення для рівнинного рельєфу). Якщо рельєф горбистий чи гірський, то кут необхідно збільшувати.
- **Максимальна відстань** (Max distance) – 1 м.
- **Розмір ділянки** (Cell size) – 50 м.

Після класифікації щільну хмару точок можна розфарбувати у відповідності до призначених класів обравши *Dense Cloud Classes* в методах відображення щільної хмари на панелі інструментів (рис. 2.3.2).

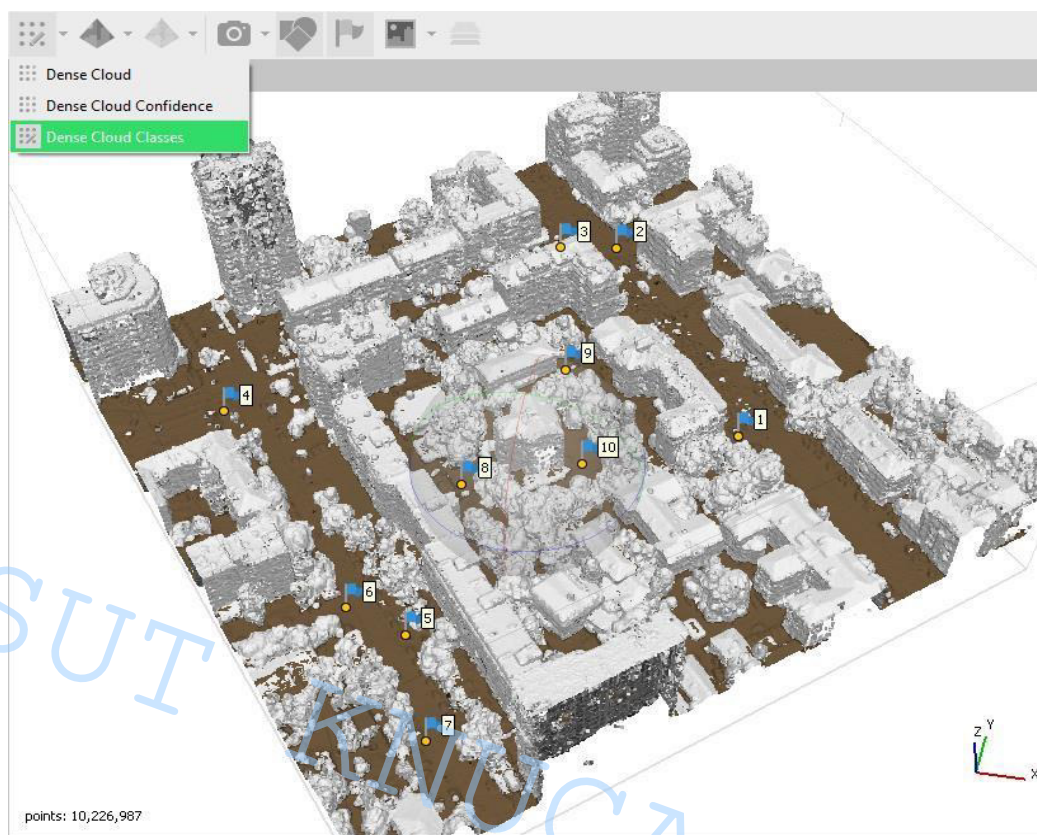


Рис. 2.3.2 Щільна хмара з класифікованими точками землі

Якщо певні ділянки хмари неправильно класифіковані, то класифікацію можна підправити вручну, виділивши помилкову ділянку на хмарі за допомогою інструменту *Free-form selection* на панелі інструментів та призначивши їй правильний клас у меню *Tools -Dense cloud – Assign class*.

Операція побудови ЦМР викликається з меню *Workflow – Build DEM*. Параметри подібні до побудови ортофотоплану, окрім:

- **Вихідні дані** (Source data) – Щільна хмара (Dense cloud)
- **Класи точок** (Point Classes) – Земля (Ground)

Після завершення операції в дереві ресурсів з'явиться ЦМР (DEM). Подвійний клік на ньому в дереві ресурсів відкриє ЦМР у вкладці *Ortho* (рис. 2.3.3). Отримана ЦМР буде візуалізована з відтіненням (Hillshade), що дозволяє легше виявити піки і різкі перепади рельєфу. Якщо піки на моделі не

відповідають реальному рельєфу, це означає, що деякі точки неправильно класифіковані.

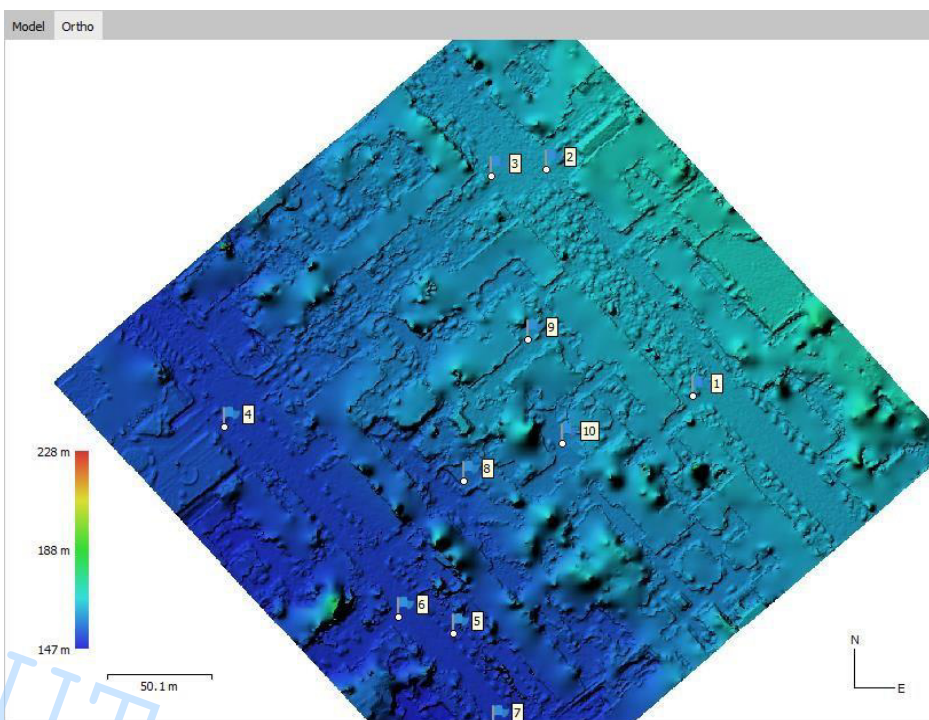


Рис. 2.3.3 Результат побудови цифрової моделі рельєфу

В таких випадках доцільно повторити класифікацію точок щільної хмари з іншими параметрами або вручну виправити неправильно класифіковані точки і повторити побудову ЦМР (рис. 2.3.4).

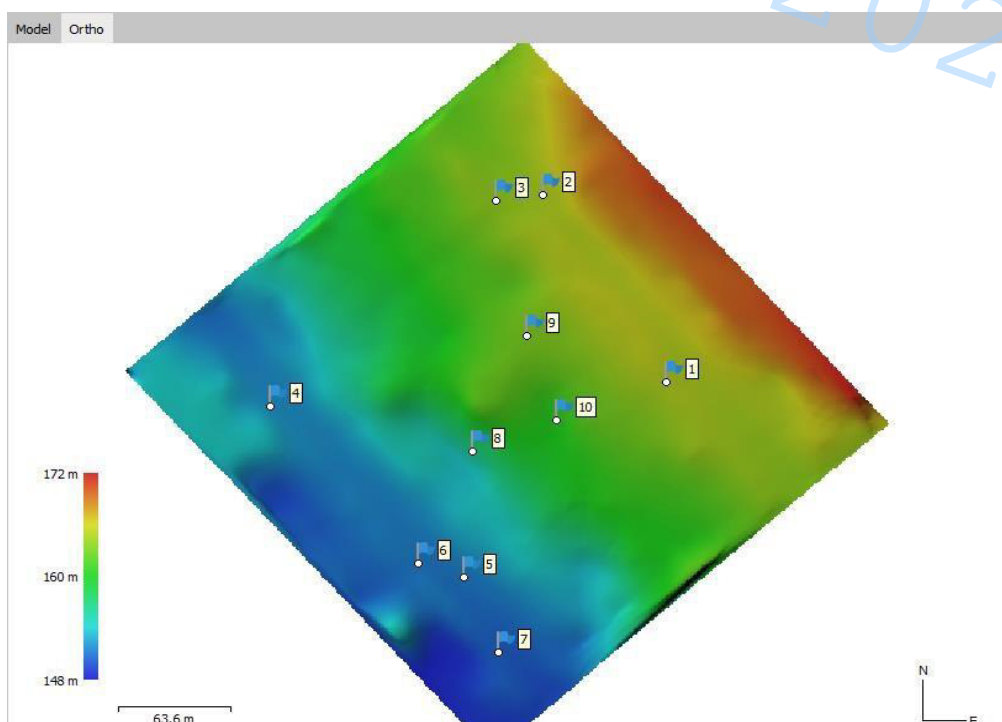


Рис. 2.3.4 Цифрова модель рельєфу з виправленою класифікацією точок

Загальний алгоритм роботи можна представити у вигляді блок-схеми (рис.2.3.5)

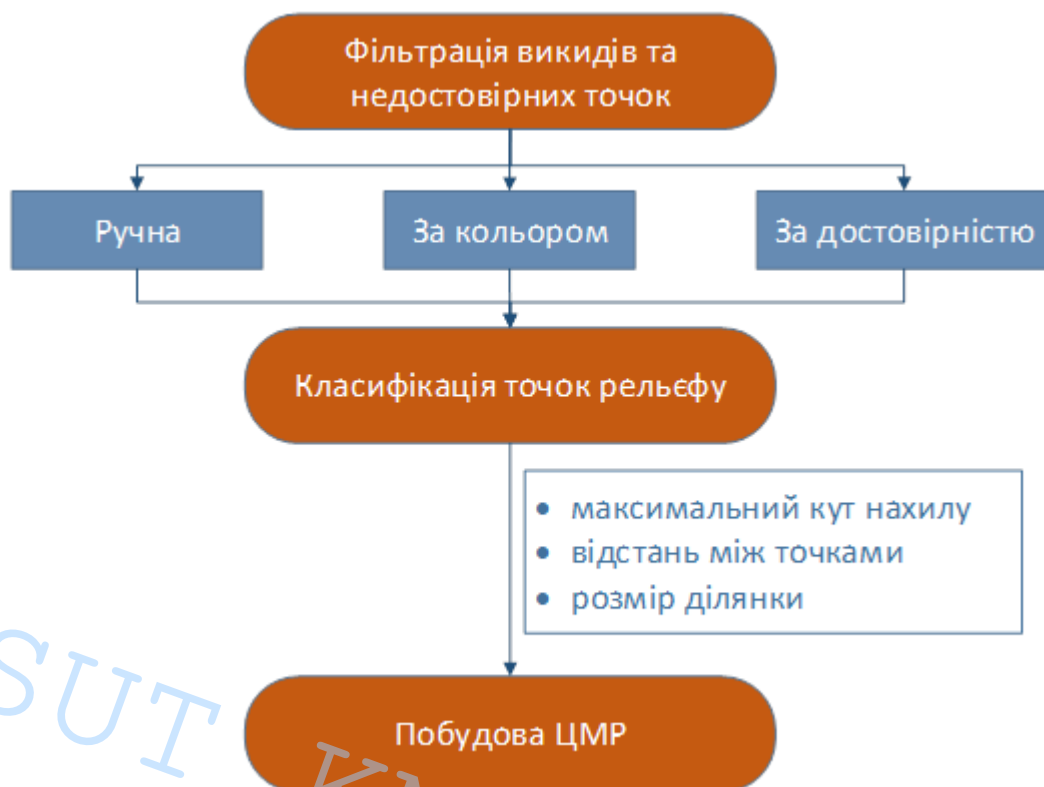



Рис. 2.3.5 Алгоритм виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Agisoft Metashape


2.3.2. Методика виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Cloudcompare

По аналогії потрібно спочатку відфільтрувати хмару точок. Інструмент *Вилучення статистичних викидів (Statistical Outlier Removal)* використовується для видалення випадкових точок – «вильотів». Суть операції полягає в обчислення відстаней від кожної точки до найближчих сусідніх точок. Якщо така відстань значно перевищує середню відстань між точками, то відповідна точка видаляється.

Операція запускається з меню *Tools – Clean – SOR filter* або з відповідної кнопки  на панелі інструментів і регулюється двома параметрами:

- *Кількість сусідів для обчислення відстаней (Number of neighbors)*. Чим більше сусідніх точок аналізується – тим менша імовірність видалення точки, оскільки більше віддалених точок буде брати участь у обчислення відстаней. Тому доцільно виставляти високі значення параметра на щільних хмарах точок.
- *Коефіцієнт середнього відхилення точок (Standard deviation multiplier threshold)*. Якщо хмара точок має рівномірну щільність, то доцільно залишати значення коефіцієнта 1. При нерівномірному розподілу точок рекомендується збільшувати коефіцієнт. Не рекомендується встановлювати значення коефіцієнта меншим ніж 1, оскільки в цьому випадку з великою імовірністю відфільтруються і «корисні» точки.

В результаті виконання операції в дереві ресурсів з'явиться нова хмара точок з суфіксом «.clean».

Створення поверхні в CloudCompare здійснюється простим моделюванням поверхні землі регулярною сіткою (GRID). Обов'язково потрібно видалити шумові точки, які знаходяться під поверхнею землі. Операція побудови ЦМР викликається з меню *Tools – Projection – Rasterize* або відповідною кнопкою  на панелі інструментів. Суть операції зводиться до пошуку найнижчої точки в кожній клітинці GRID-сітки – як правило ця точка відповідає земній поверхні. У спливаючому вікні (рис. 2.3.6) необхідно встановити такі параметри:

- **Step** - крок сітки GRID-моделі. Залежить від щільності точок моделі і від форми рельєфу місцевості. Чим більші перепади рельєфу – тим менший крок сітки потрібно встановлювати для коректного відображення ЦМР. Не рекомендується виставляти крок сітки менший ніж відстань між точками моделі на хмарі. Для більшості топографічних цілей достатньо кроку сітки в 0,5-5 м.
- **Direction** - Z
- **Cell height** – minimum
- **Empty cells fill with** - leave empty

Після чого на вкладці **Export** потрібно натиснути **Cloud**.

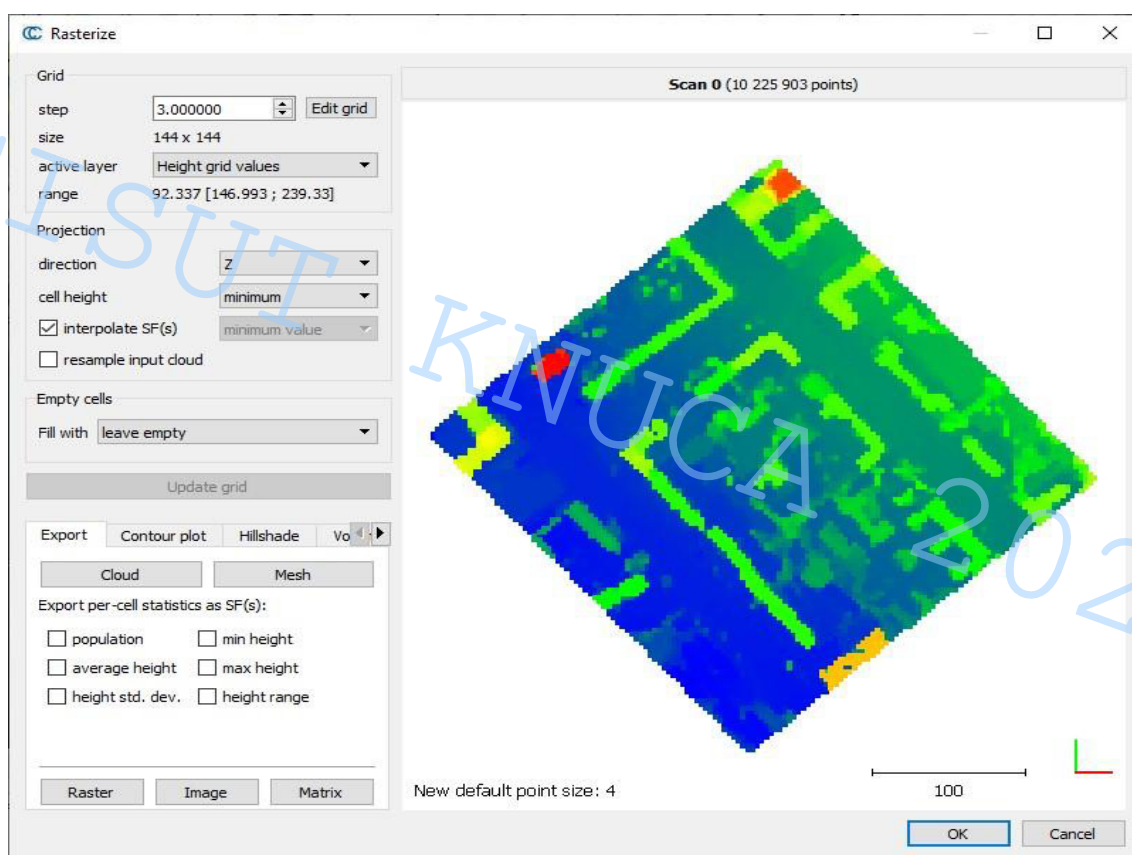


Рис. 2.3.6 Вікно налаштування параметрів інструмента Rasterize

В дереві ресурсів і у вікні моделі з'явиться нова хмара точок з префіксом «.raster». Окрім точок земля вона буде містити і інші точки (наприклад точки даху будівель, якщо в межах клітинки не було інших точок) (рис. 2.3.7). Такі зайві точки необхідно відфільтрувати вручну або за допомогою SOR фільтра. В результаті буде отримано модель, що містить лише точки землі (рис. 2.3.8).

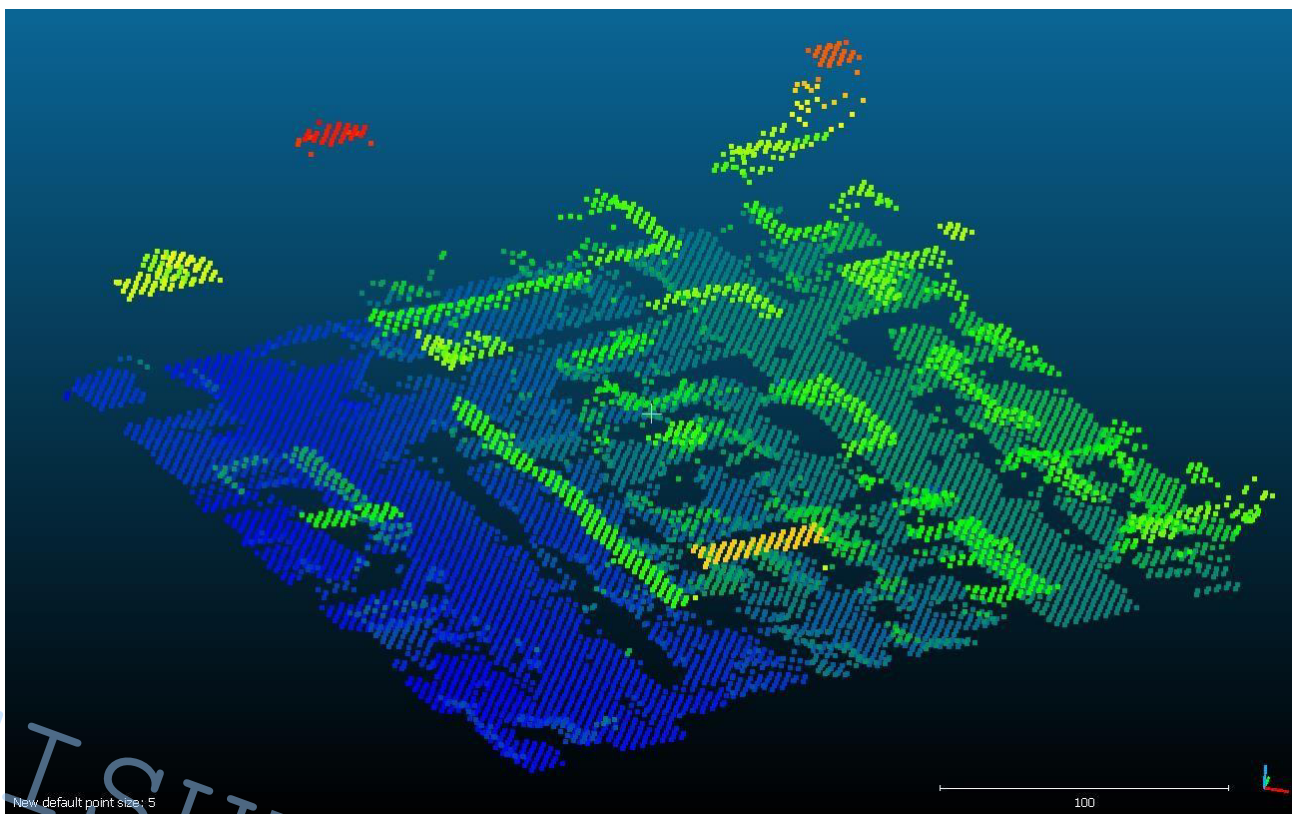


Рис. 2.3.7 Результат виконання операції Rasterize

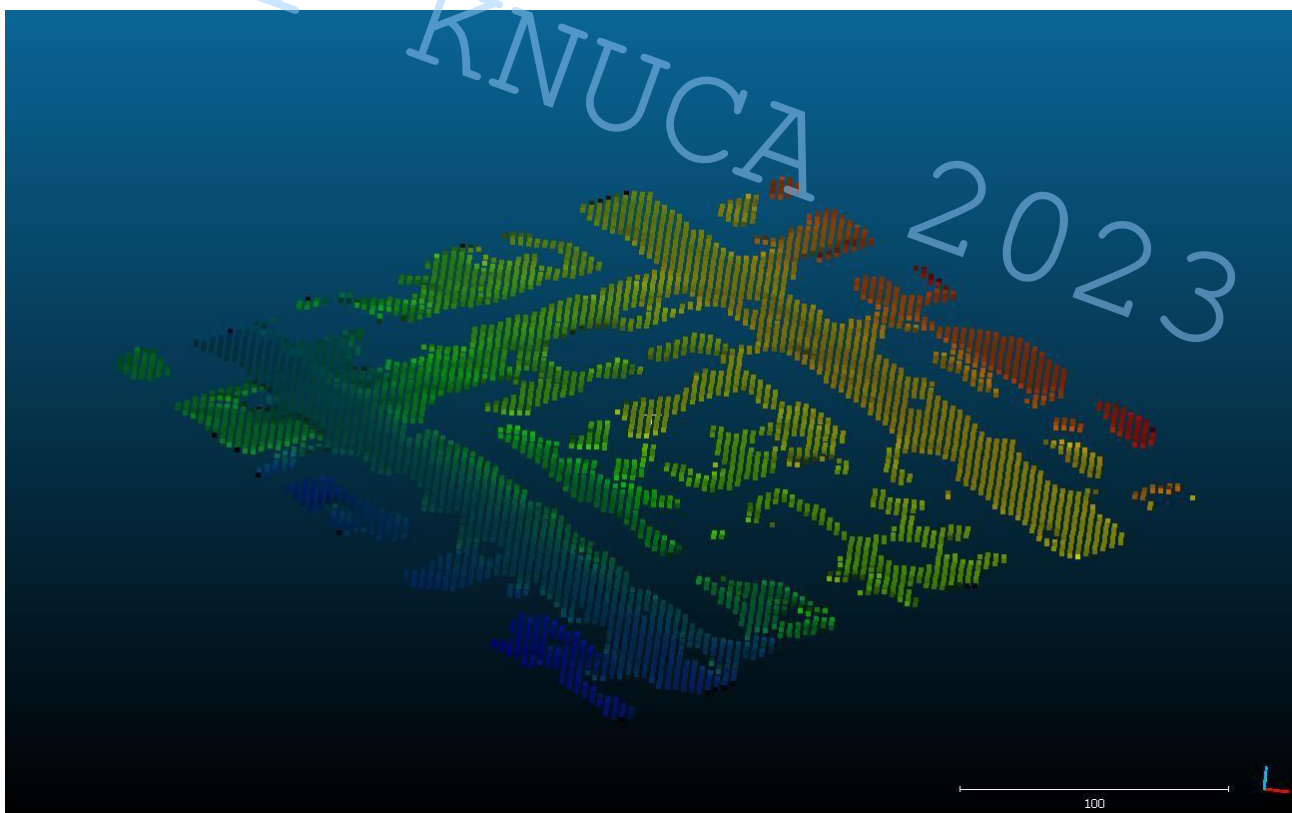


Рис. 2.3.8 Хмара точок землі, отримана після фільтрації

Для створення поверхні землі на основі такої хмари точок необхідно виконати команду *Edit – Mesh – Delaunay 2.5 D (XY plane)* зі значенням *Max*

edge length = 0. В результаті буде побудовано модель рельєфу у вигляді полігональної поверхні (рис. 2.3.9).

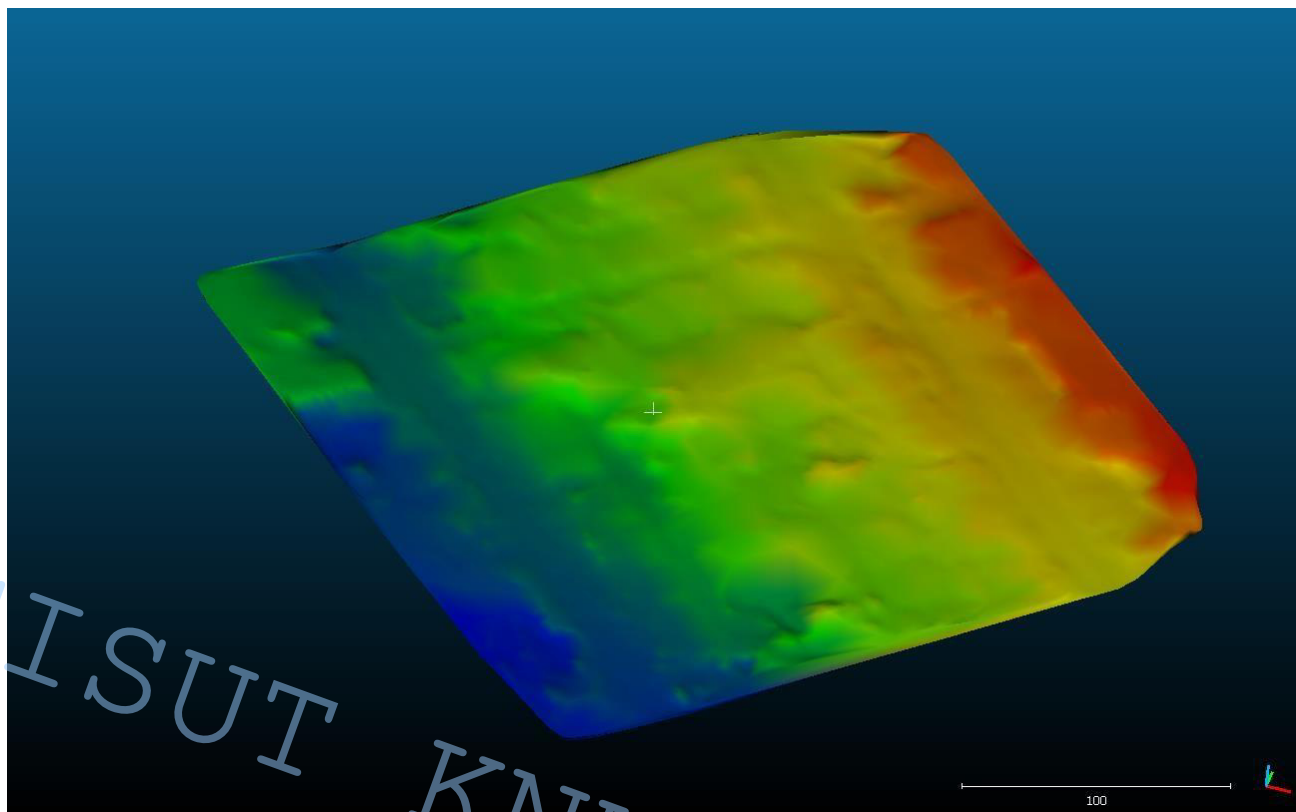


Рис. 2.3.9 Результат побудови полігональної моделі рельєфу

2.3.3. Методика виділення та побудови ЦМР в програмному комплексі Quick terrain model

Після завантаження даних у вигляді хмари точок необхідно проаналізувати наші дані на рівномірність даних. Для цього переходимо на вкладку Analysis – Generative Grid Statistics (рис.2.3.10).

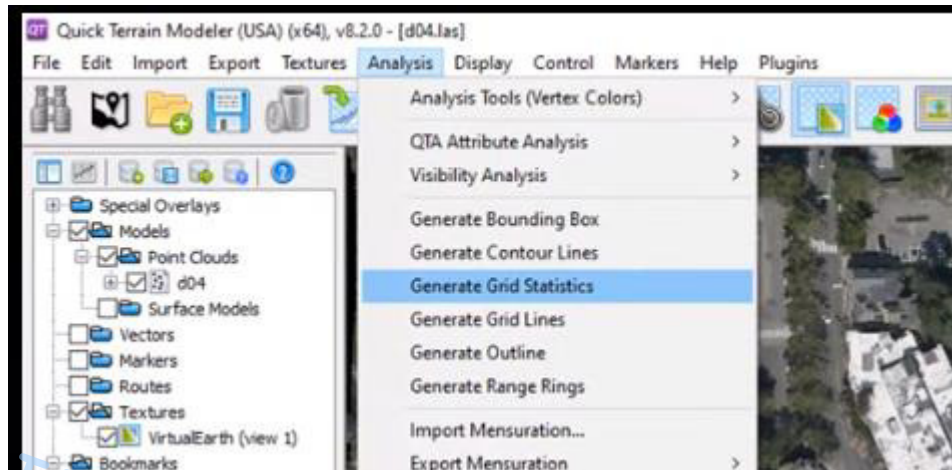


Рис. 2.3.10 Аналіз хмари точок

У відкритому вікні в блоці Метрика вибираємо змінну Щільність (Density) та натискаємо Calculate Metrics для розрахунку значень (рис.2.3.11).

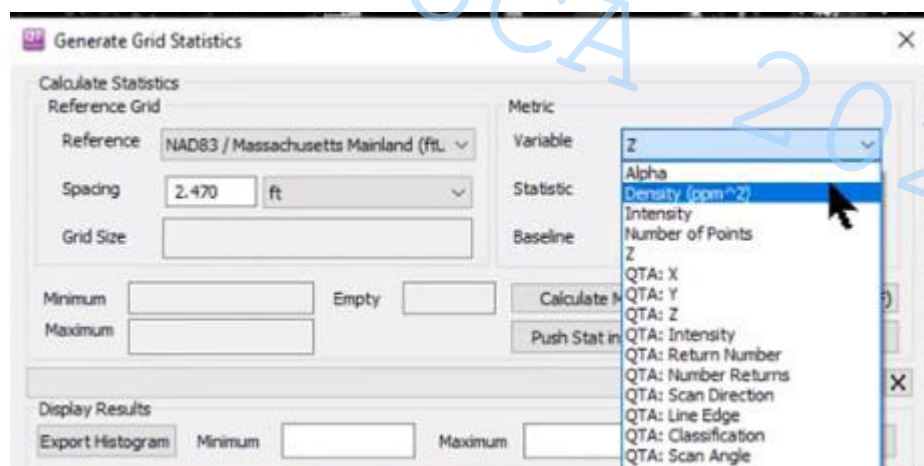


Рис. 2.3.11 Вибір параметру щільності хмари точок

Після цього буде сформовано розподіл щільності точок по хмарі з мінімальними та максимальними значеннями (рис.2.3.12).

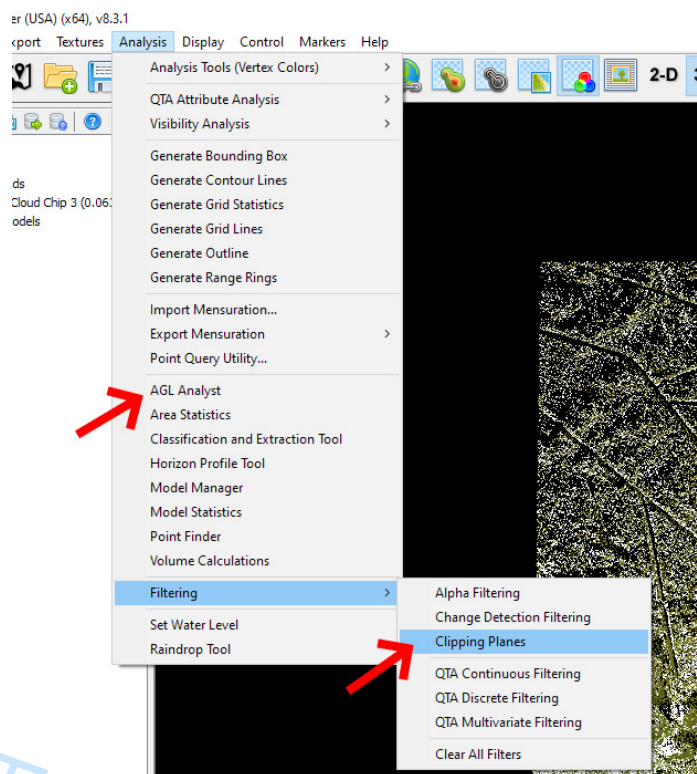


Рис. 2.3.14 Інструменти фільтрації хмари точок

Після фільтрації хмари точок можна переходити безпосередньо до класифікації. Для цього переходимо в меню Analysis - Classification and Extraction Tool, або використавши відповідну кнопку на панелі інструментів (рис.2.3.15).

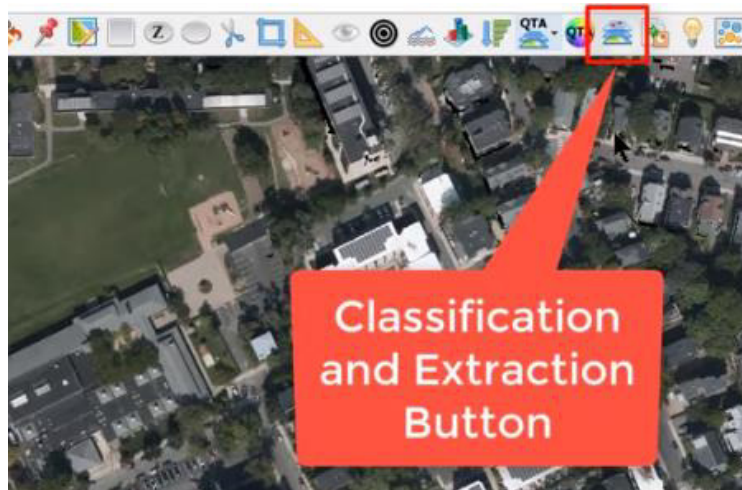


Рис. 2.3.15 Меню класифікації хмари точок

В блоці Загальних налаштувань буде запропоновано **Орієнтирне значення розміру сітки**, для визначення точки на місцевості в хмарі точок. Це значення не варто встановлювати нижче запропонованого параметру. Другий показник це **Розмір найбільшого об'єкту**. Це значення повинно бути встановлено по розміру найбільшому об'єкту в хмарі точок, якщо воно буде менше ніж існуючі окремі об'єкти, то можна отримати неякісну класифікацію на великих об'єктах. Цей показник також впливає на тривалість процесу класифікації, із збільшенням розміру час на класифікацію збільшуватиметься (рис.2.3.16).

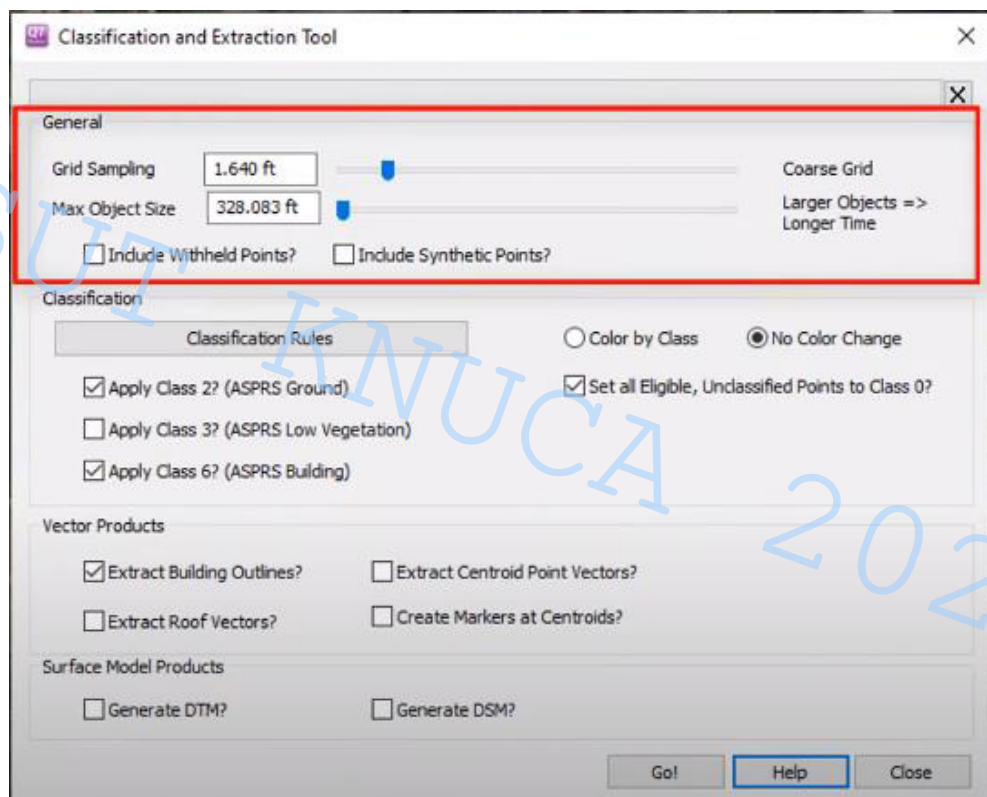


Рис. 2.3.16 Загальні налаштування класифікації

В блоці Класифікація можна налаштувати які точки будуть класифіковані. Також можна обрати параметр надання класу окремого кольору, що буде зручно для аналізу результату класифікації (рис.2.3.17).

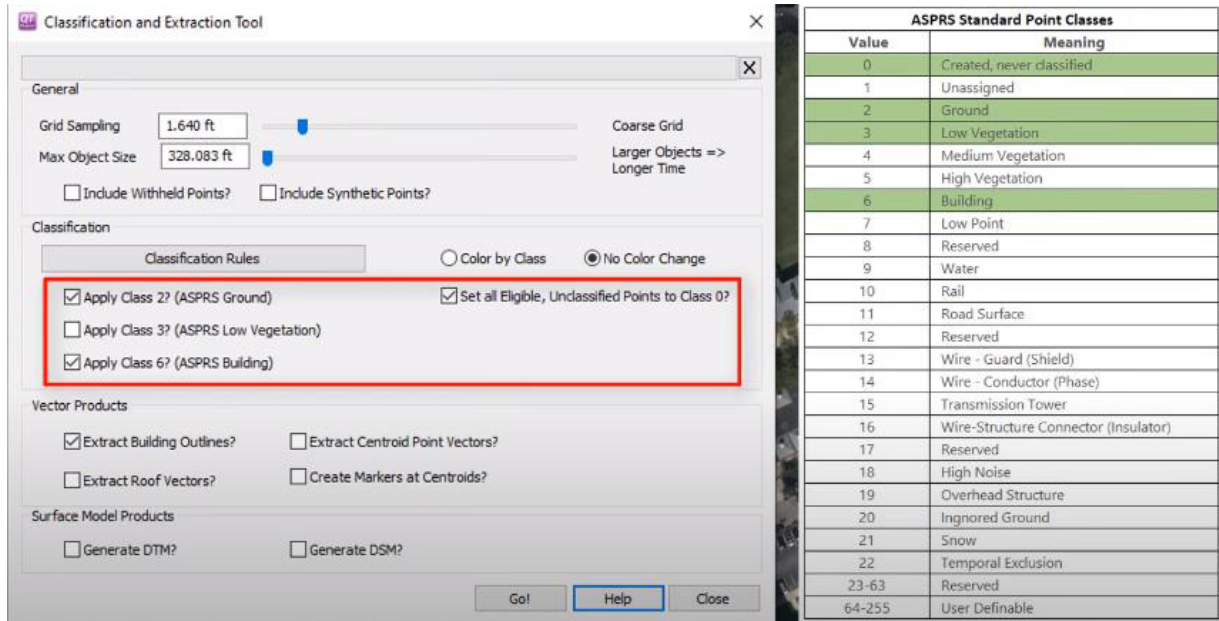


Рис. 2.3.17 Визначення класів точок

В блоці Вектори можна налаштувати виділення контурів споруд, покрівлі та інше. Після завершення операції векторні дані будуть додані у вигляді додаткового шару в панелі зліва (рис.2.3.18).

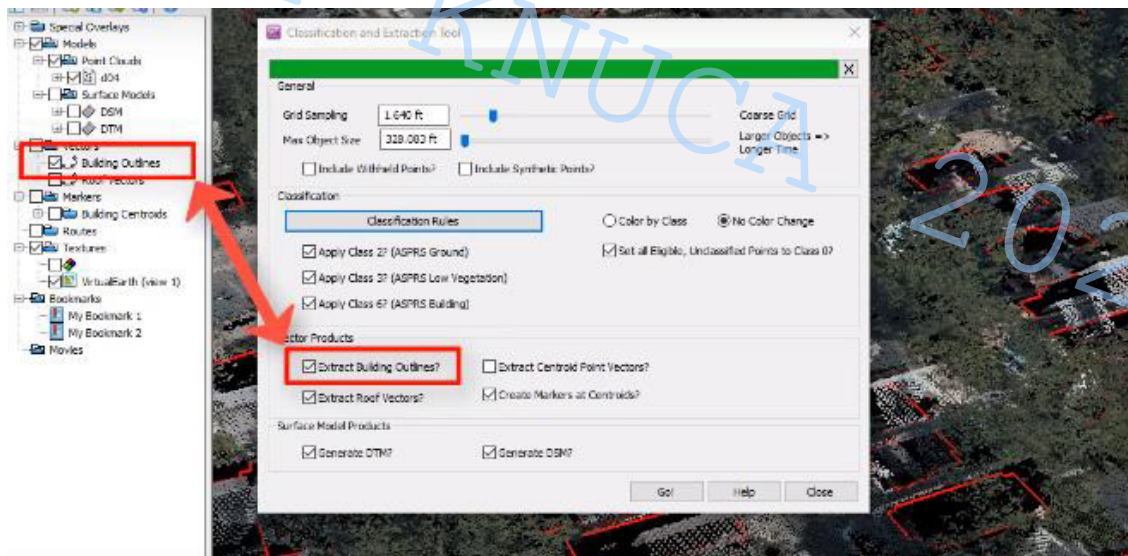


Рис. 2.3.18 Виділення контурів споруд

Контури будинків та покрівлі будуть розподілені в окремі шари (рис.2.3.19).

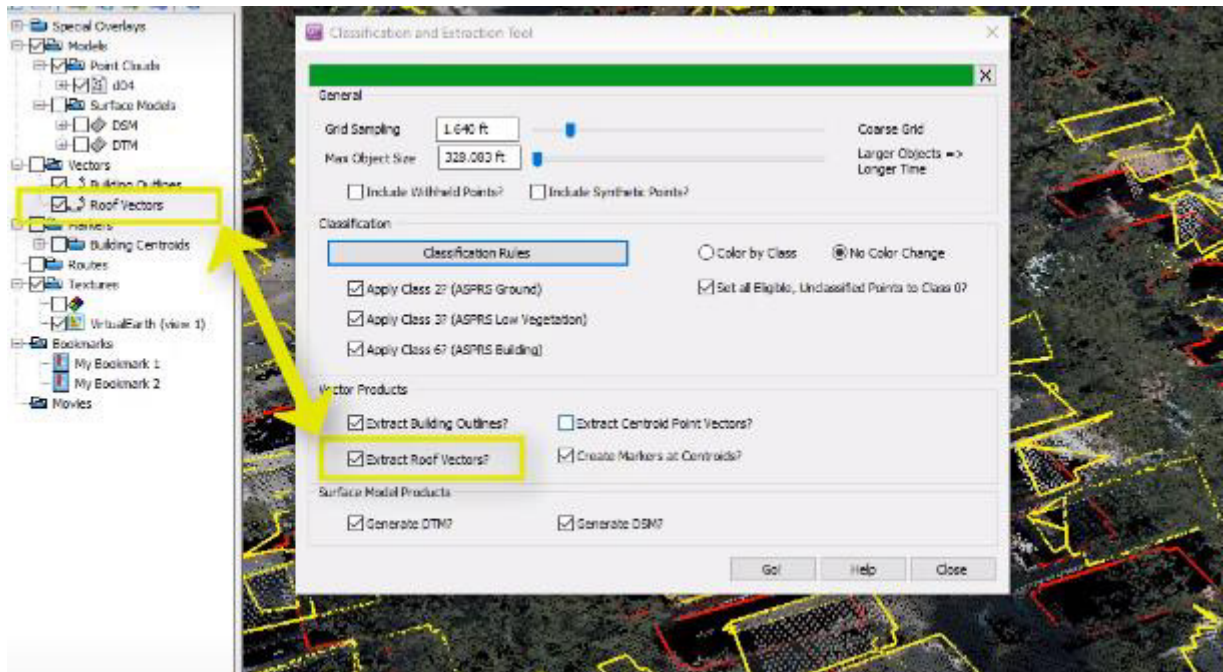


Рис. 2.3.19 Виділення контурів покрівель

В останньому блоці можна налаштувати створення ЦМР чи ЦММ. Їх роздільна здатність визначається кроком сітки, яку ми задавали в загальному блоці з самого початку (рис.2.3.20).

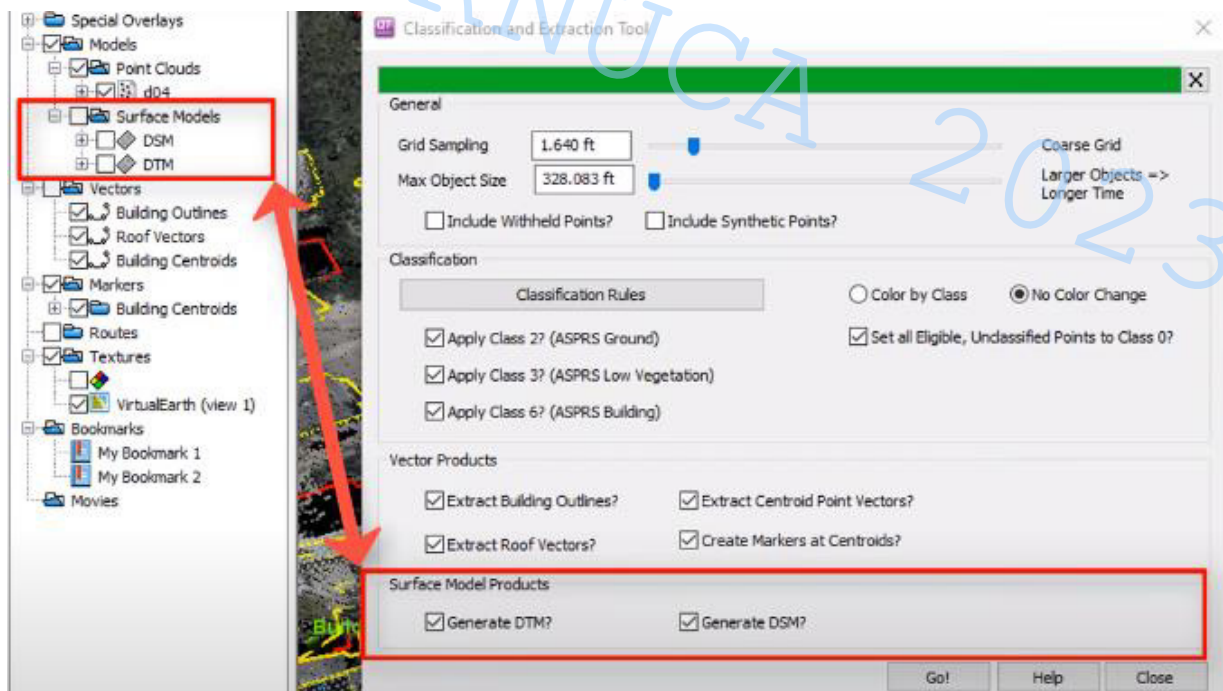


Рис. 2.3.20 Генерація ЦММ та ЦМР

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК ВИДІЛЕННЯ ЦМР

3.1. Побудова ЦМР за даними наземного лазерного сканування

Перша територія рівнинна відкрита місцевість біля Каліфорнії (рис.3.1.1), розмір території 250 на 150 метрів.



Рис. 3.1.1. Рівнинна територія TLS знімання

На хмарі точок присутні кущі, забори, невеличкі прибудови та потрапили інші лазерні сканери разом із штативами (рис.3.1.2).



Рис. 3.1.2. Об'єкти на хмарі точок

Тепер спробуємо отримати ЦМР по цій хмарі в усіх трьох програмних продуктах та порівняти їх результати. Спочатку отримано результати в CloudCompare. Розділена хмара точок представлена на рис.3.1.3

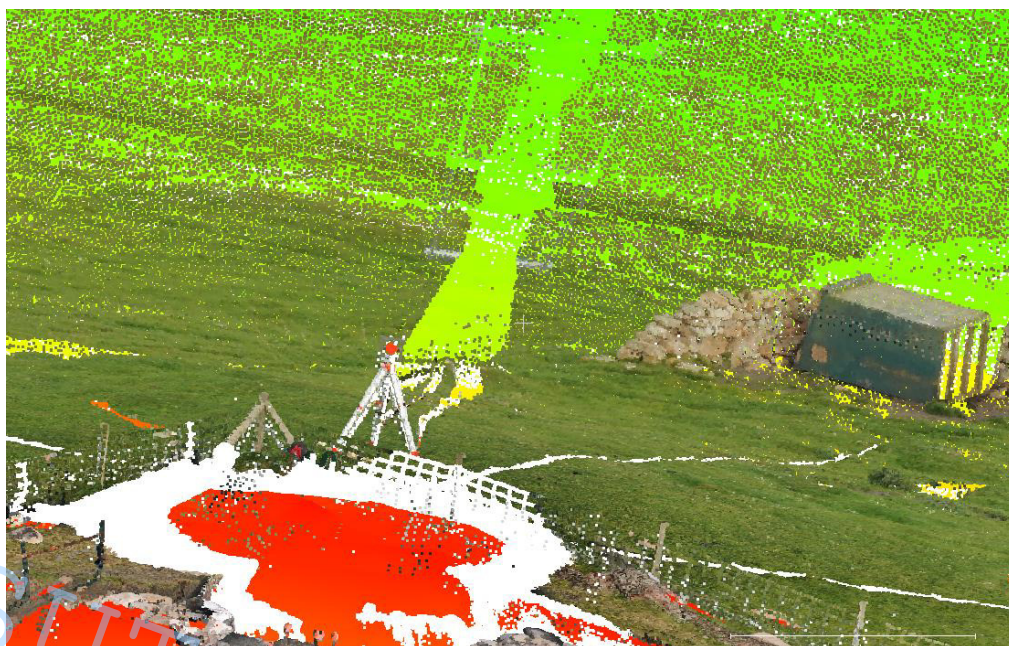


Рис. 3.1.3. Розділена хмара точок

Після виокремлення точок рельєфу від точок ситуації можна одразу побудувати поверхню та промалювати горизонталі, але ці горизонталі будуть дуже «зашумлені» за рахунок неоднорідної поверхні землі (рис 3.1.4).

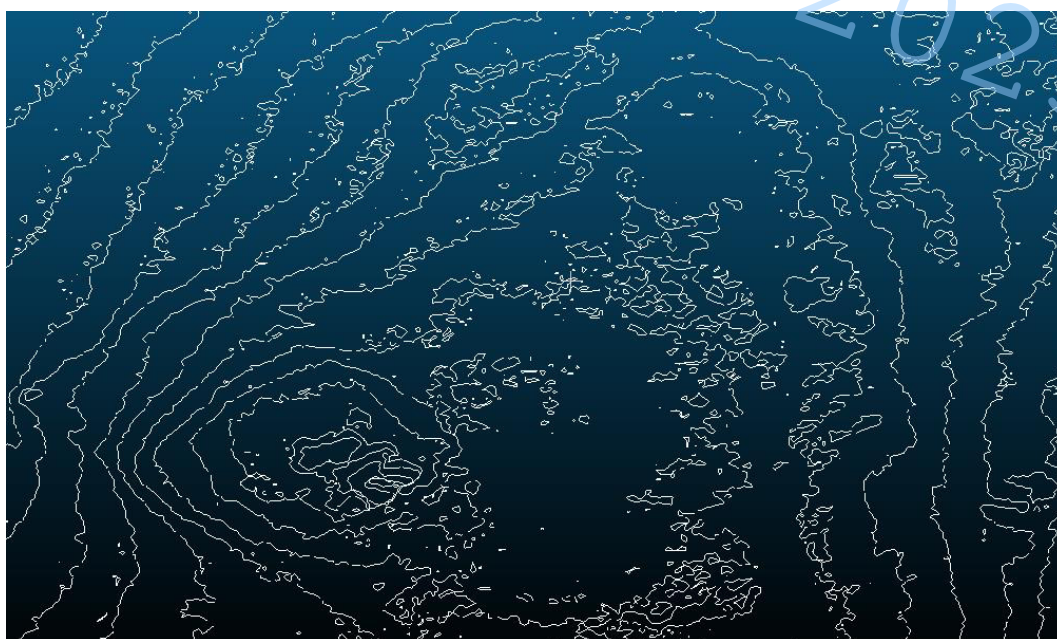


Рис. 3.1.4. Зашумлені горизонталі

Тому до побудови горизонталей поверхню необхідно згладити або спростили. Найкраще це зробити згладжування Лапласа (рис.3.1.5).

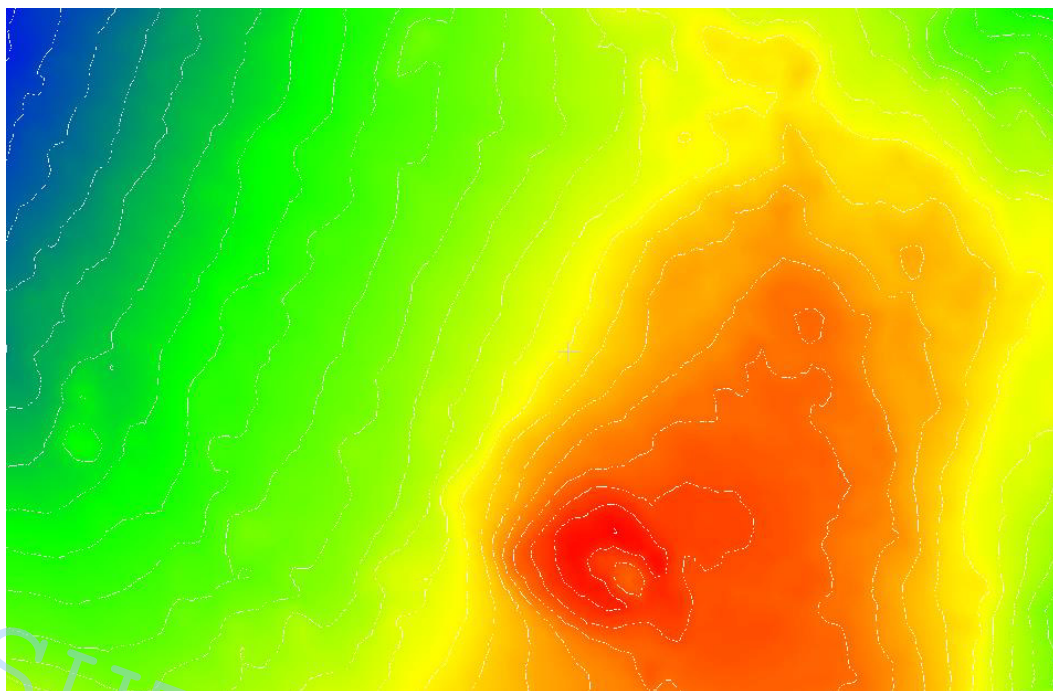


Рис. 3.1.5. Поверхня після згладжування (CloudCompare)

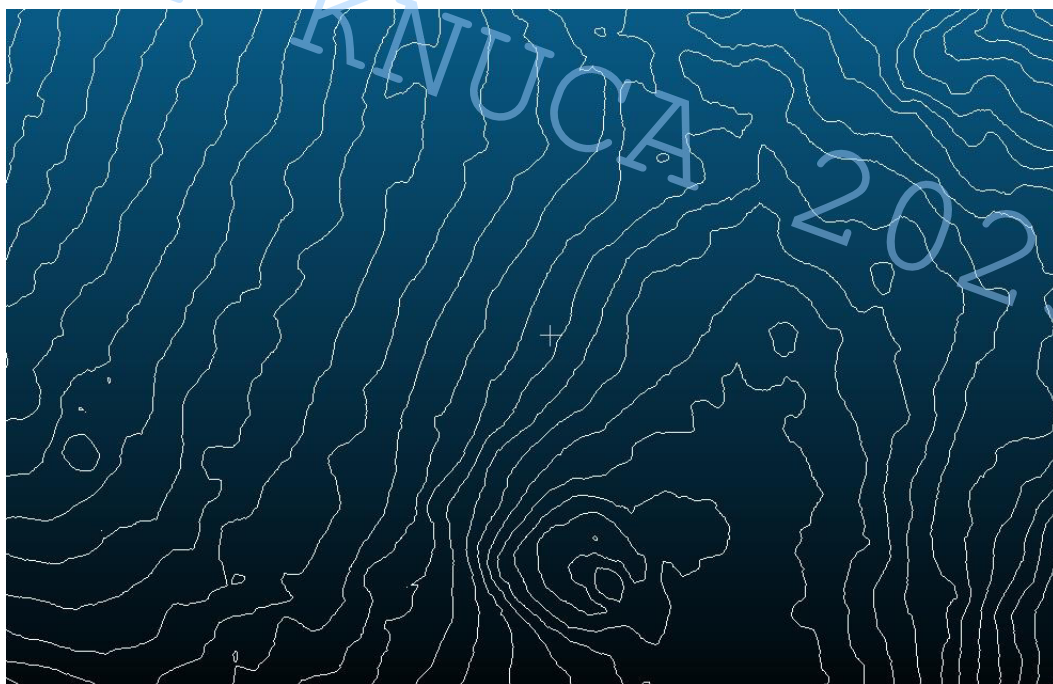


Рис. 3.1.6. Горизонталі з кроком 0,5м по згладженій поверхні (CloudCompare)

Наступна класифікація була виконана в Agisoft Metashape, так само для початку подивимось на те, як відділено об'єкти ситуації від поверхні землі. (рис.3.1.7).

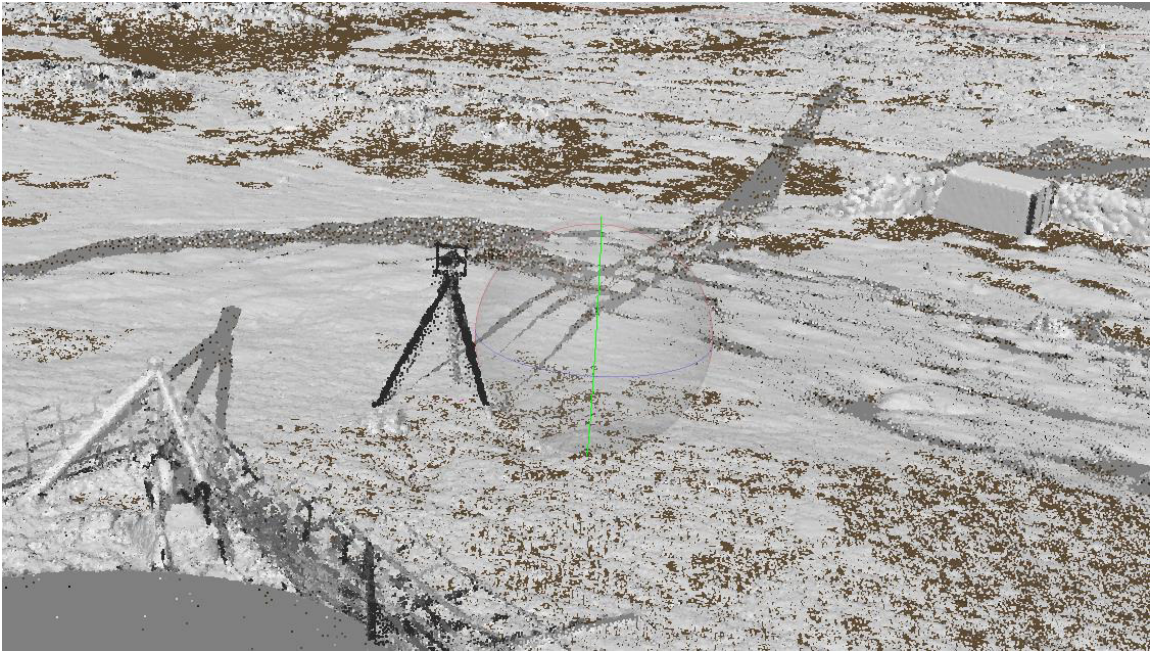


Рис. 3.1.7. Розділена хмара точок Agisoft Metashape

Як видно, алгоритми чудово виконали свою задачу і більшість точок об'єктів ситуації забарвлені білим кольором, що вказує на віднесення їх до іншого класу ніж точки землі.

Отримана ЦМР з горизонталями відображено на рис.3.1.8.

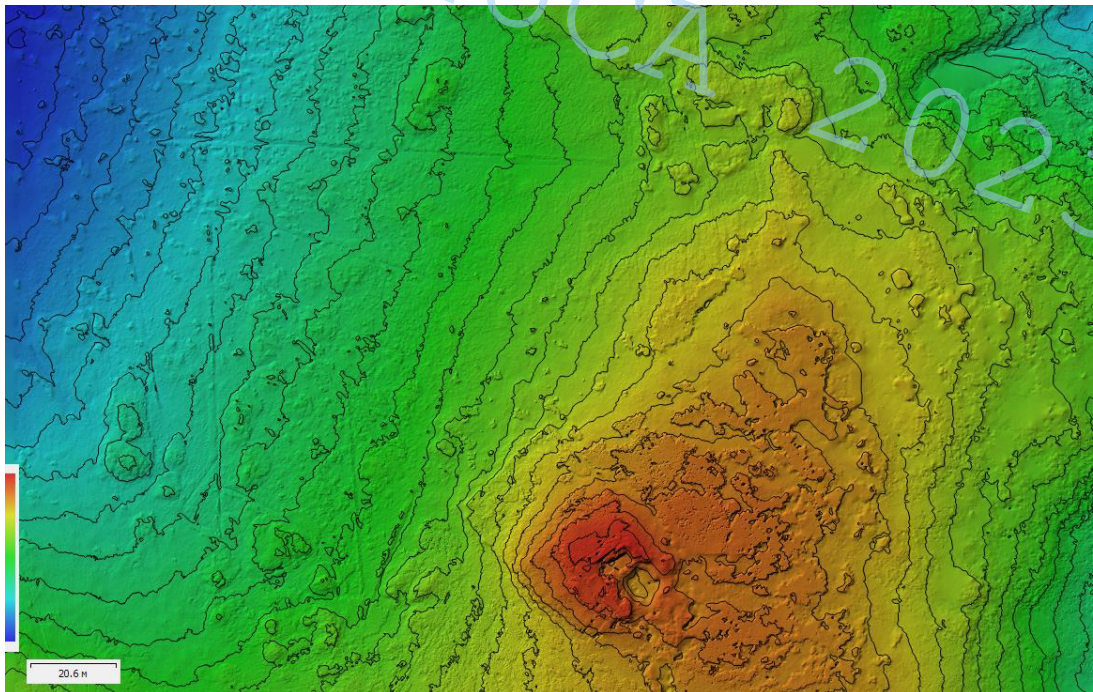


Рис. 3.1.8. Поверхня ЦМР з горизонталями через 0,5м в Agisoft Metashape

Наступна класифікація була виконана в QT Modeler, так само для початку подивимось на те, як відділено об'єкти ситуації від поверхні землі. (рис.3.1.9).

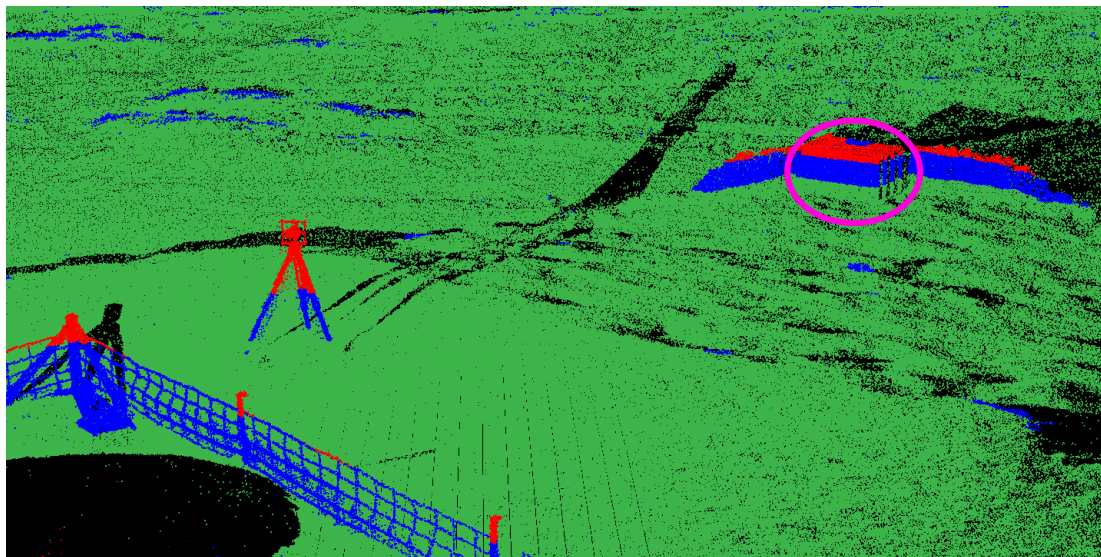


Рис. 3.1.9. Розділена хмара точок QT Modeler

Як видно більшість точок об'єктів ситуації було добре відділено, проте деякі частини, на малюнку в кружечку, були відділені не до самого низу і частина прибудови залишилась в хмарі поверхні землі. Проте після згладжування поверхні цей момент виглядає не так сильно виразно (рис.3.1.10.)



Рис. 3.1.10. Згладжена поверхня QT Modeller

В програмі є зручний інструмент перегляду перетинів по лінії, на якому добре видно хмару точок, лінію поверхні ЦММ та ЦМР (рис.3.1.11)

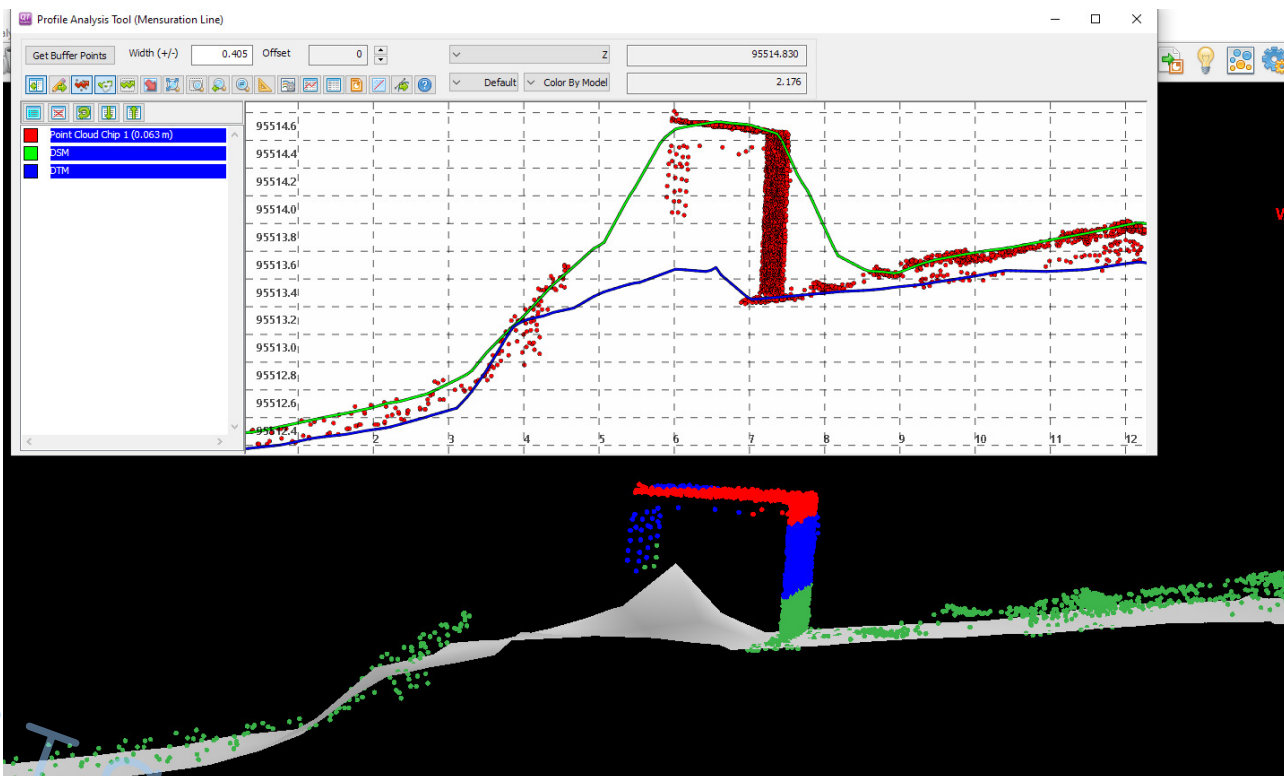


Рис. 3.1.11. Інструмент аналізу поверхні QT Modeler

Отримана ЦМР з горизонталями відображено на рис.3.1.12.

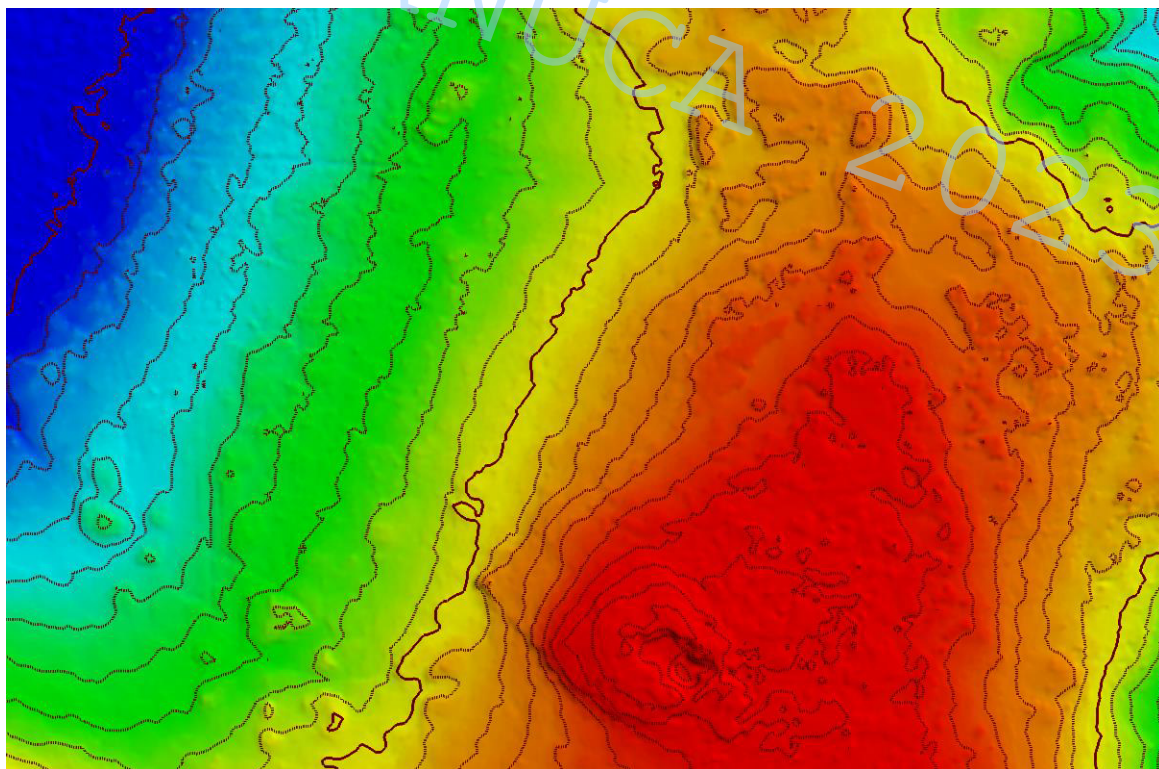


Рис. 3.1.12. Поверхня ЦМР з горизонталями через 0,5м в QT Modeler

Друга територія має менший розмір та більшу деталізацію і суттєвий перепад висот на ділянці. Територіяльно це округ Санта-Клара, штат Каліфорнія. Знімання було здійснено для кращого розуміння ерозії схилів після лісової пожежі та покращення моделювання і прогнозування таких процесів з очікуваними лісовими пожежами (рис. 3.1.13).



Рис. 3.1.13 Розташування ділянки

Розмір ділянки 190 на 130 метрів. На ній розташовано чимала кількість високих дерев (рис.3.1.14.)

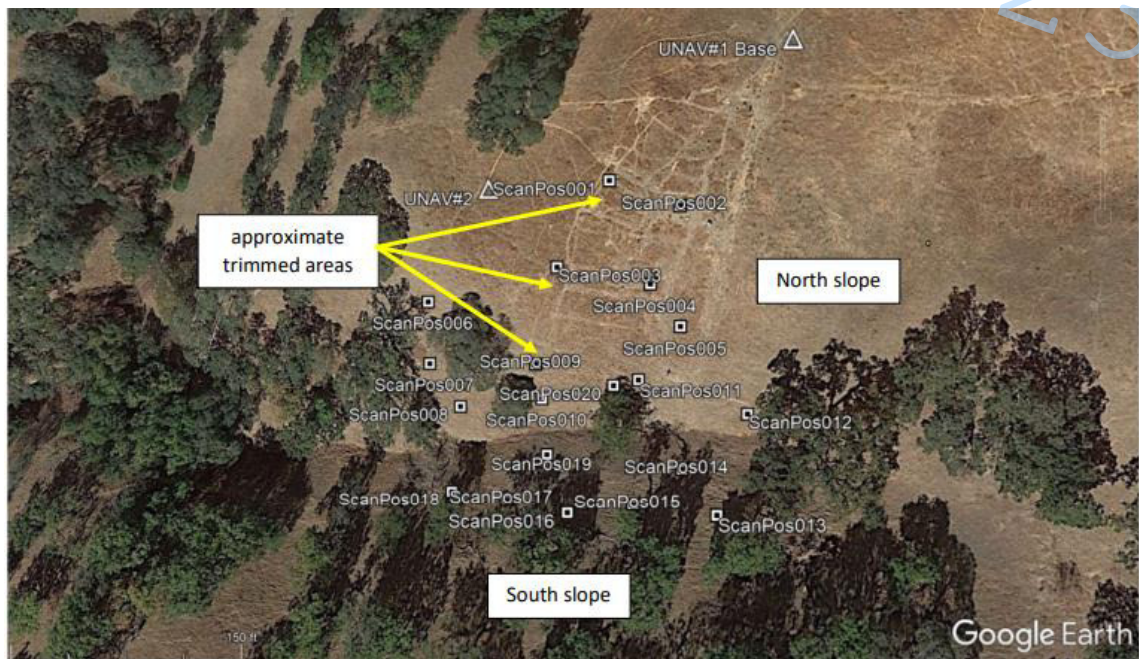


Рис. 3.1.14 Загальний вигляд ділянки та положення станцій сканування

Спроба отримати результат для такої поверхні в CloudCompare виявилась не повністю вдалою, адже частина дерев залишилась, і їх потрібно дорізати ручним способом (рис.3.1.15.)

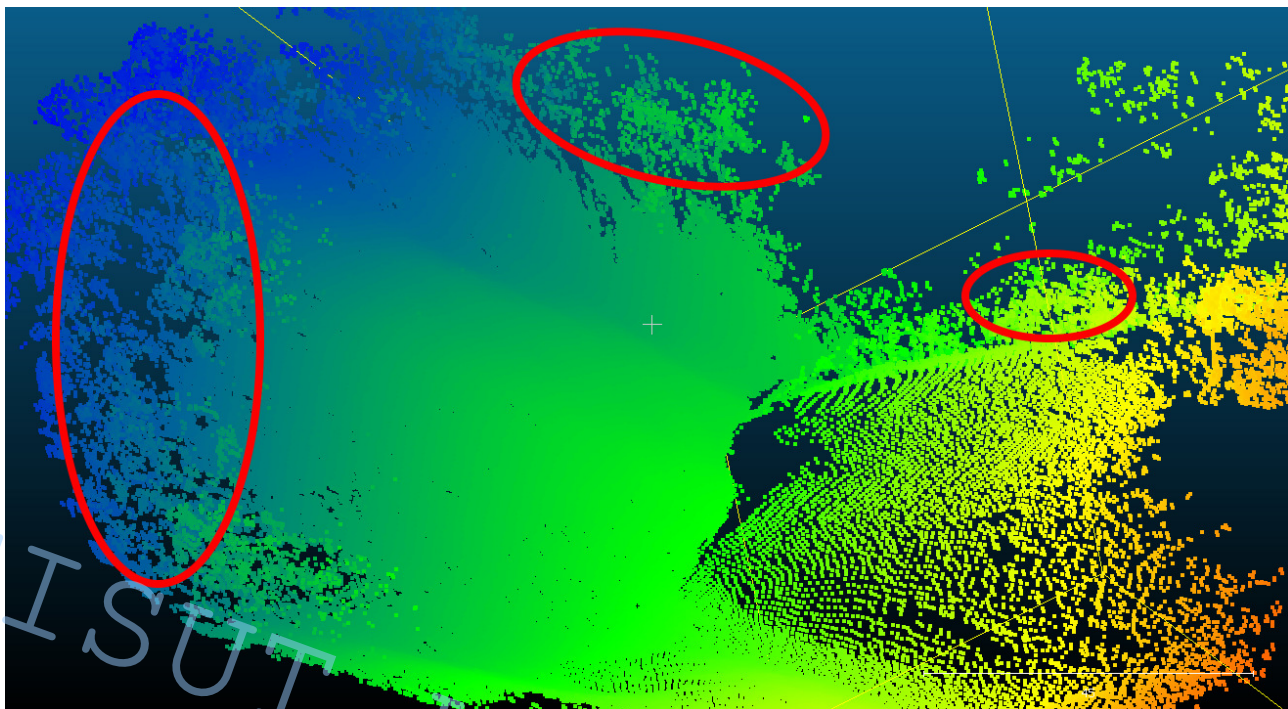


Рис. 3.1.15 Проблемні моменти в CloudCompare

А от програмний засіб QT Modeler чудово впорався із задачею і відділив поверхню землі на всіх ділянках.

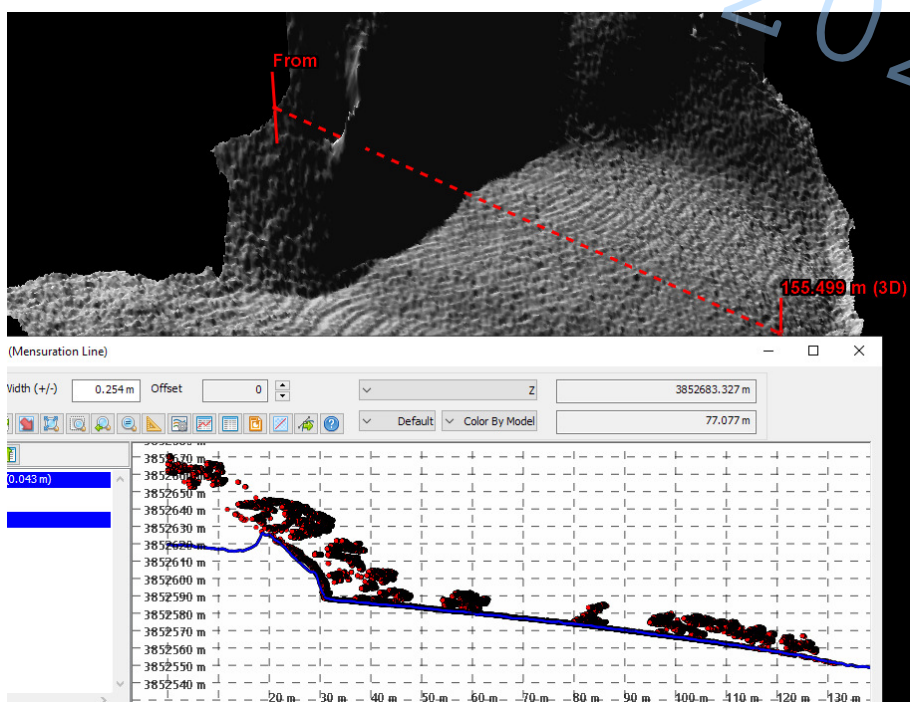


Рис. 3.1.16 Класифікація поверхні в QT Modeler

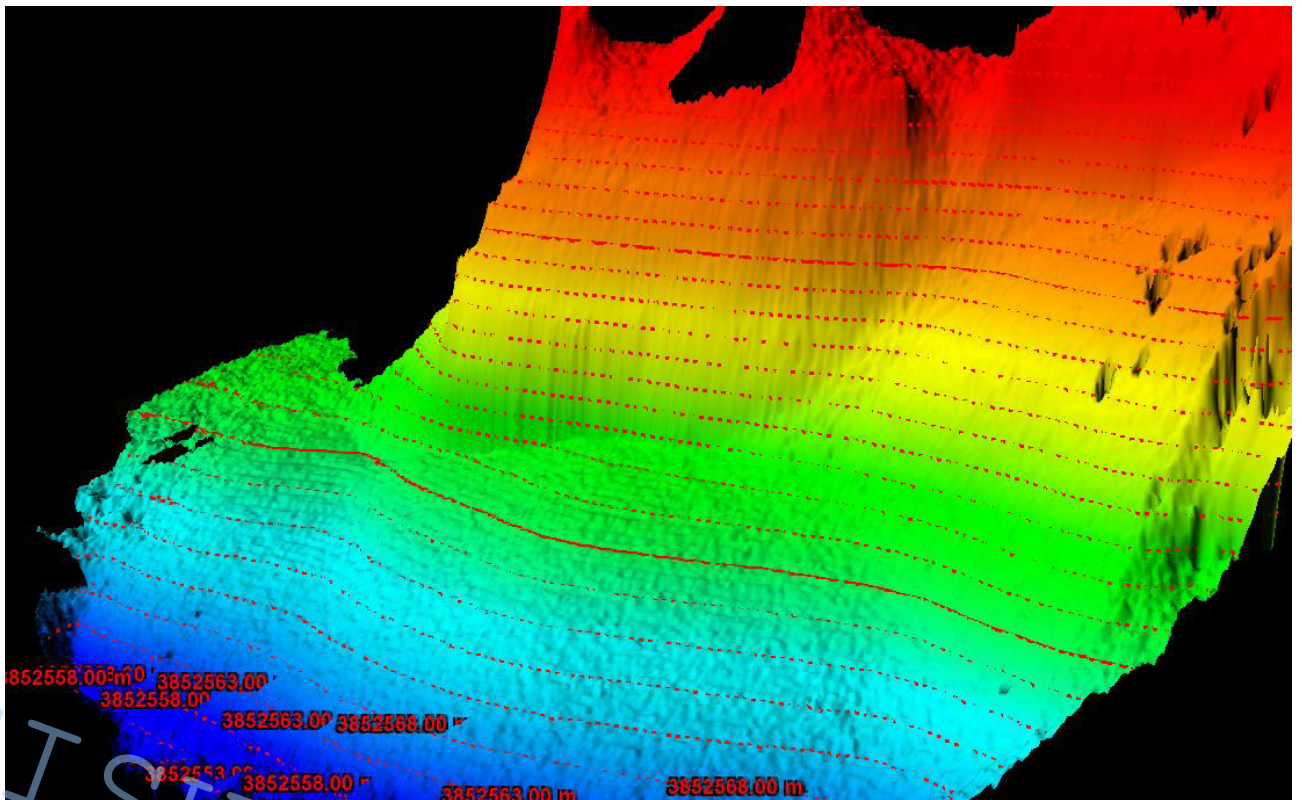


Рис. 3.1.17 Побудована поверхня в QT Modeler

Третя поверхня знаходиться в гірській місцевості та має розміри 2,3х2,4 км.

Результати в QT Modeler виявились найкращими, дерева дуже якісно відділені від поверхні землі (рис.3.1.18 – 3.1.19)

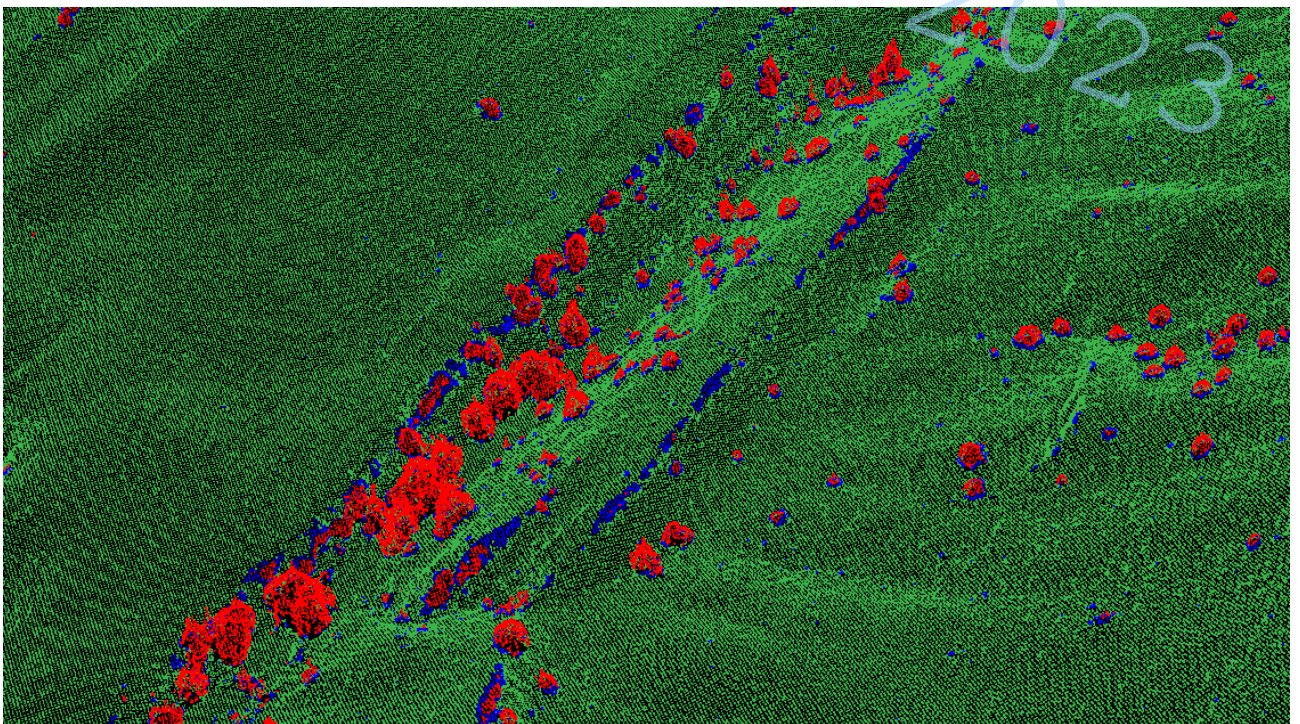


Рис. 3.1.18 Класифікація хмари точок в QT Modeler

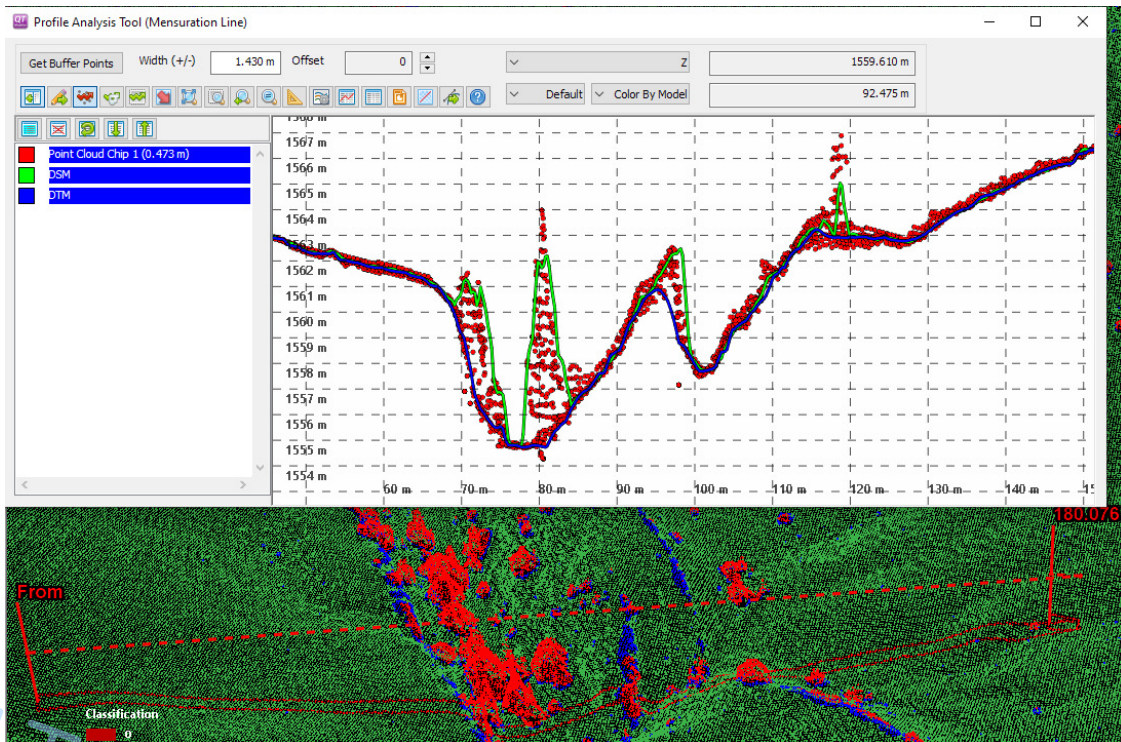


Рис. 3.1.19 Перетин хмари точок в QT Modeler

Отримана карта в вигляді горизонталей теж немає зауважень.

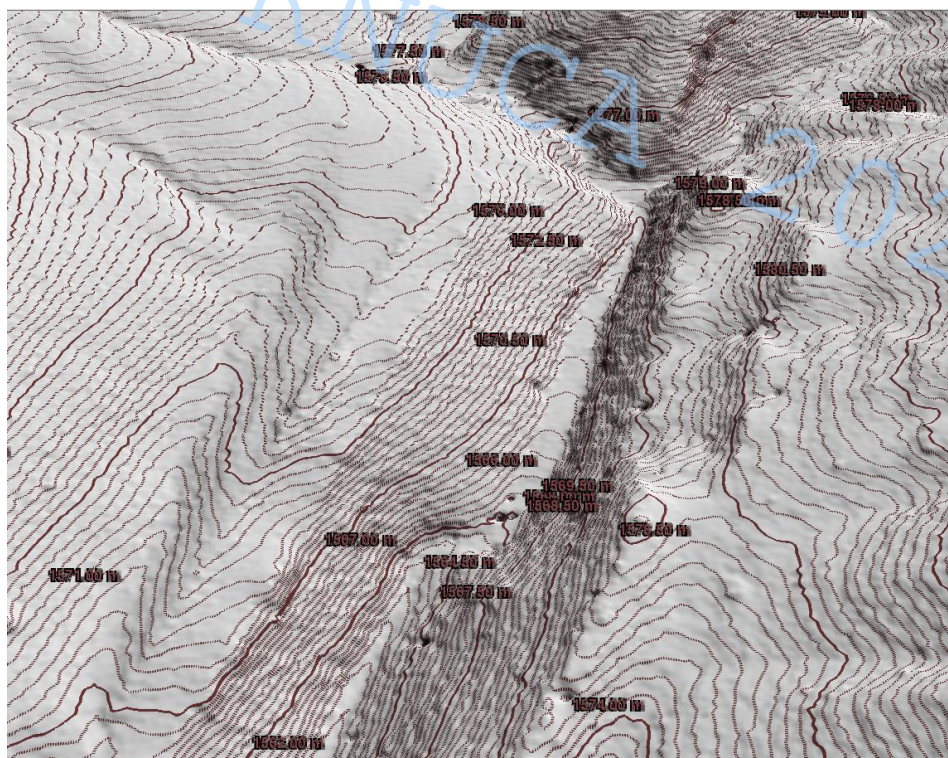


Рис. 3.1.20 Третя поверхня у вигляді горизонталей в QT Modeler

3.2. Побудова ЦМР за даними БПЛА лазерного сканування

Побудову ЦМР за даними БПЛА LiDAR системи вирішено зробити за даними роботи системи DJI Zenmuse L1 у парі з БПЛА Matrice 300 RTK. Заявлена точність такого лідара за висотою 5 см і 10 см у плані при відносній висоті польоту 50 м. Зйомка виконана в зимовий період на території середньої пагорби з переважно лісовим покривом, так само знята частина асфальтної дороги та невеликих будівель. Виконано 2 прольоти, на висоті 130 метрів над усією територією (рис. 3.2.1a) та областю дороги на 60 метрів щодо поточного рельєфу поверхні землі (рис. 3.2.1b).

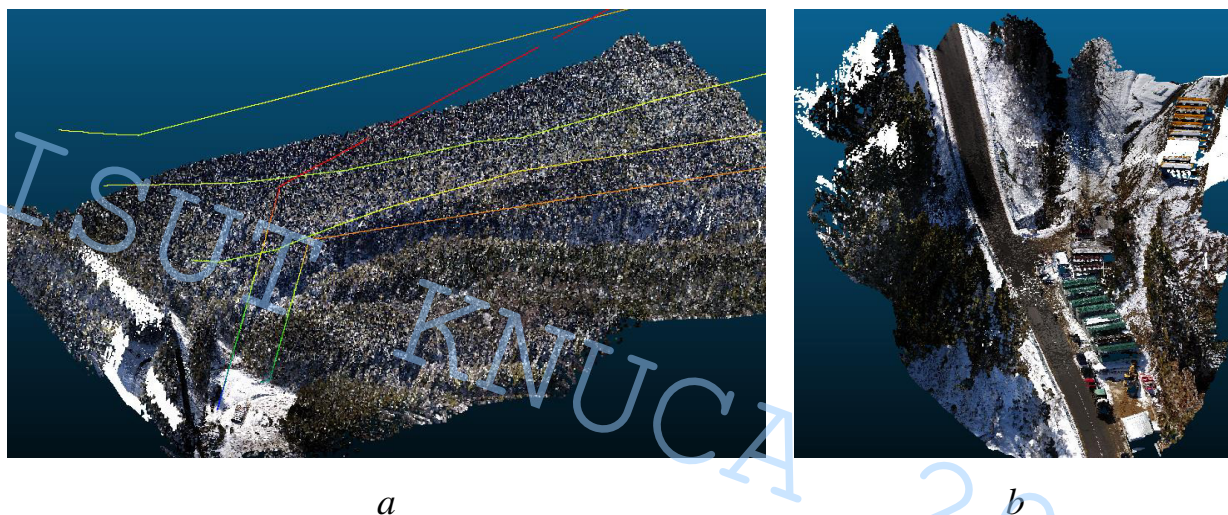


Рис. 3.2.1 Територія зйомки системою DJI Zenmuse L1, лініями відображені маршрути зйомки

Під час огляду хмари точок помічено точки нижче поверхні (рис.3.2.2)



Рис. 3.2.2 Шумові точки під рівнем землі

Класифікація частини лісової зони в Agisoft Metashape вийшла з великою кількістю шумових точки, які належать деревам, а не поверхні землі (рис.3.2.3)

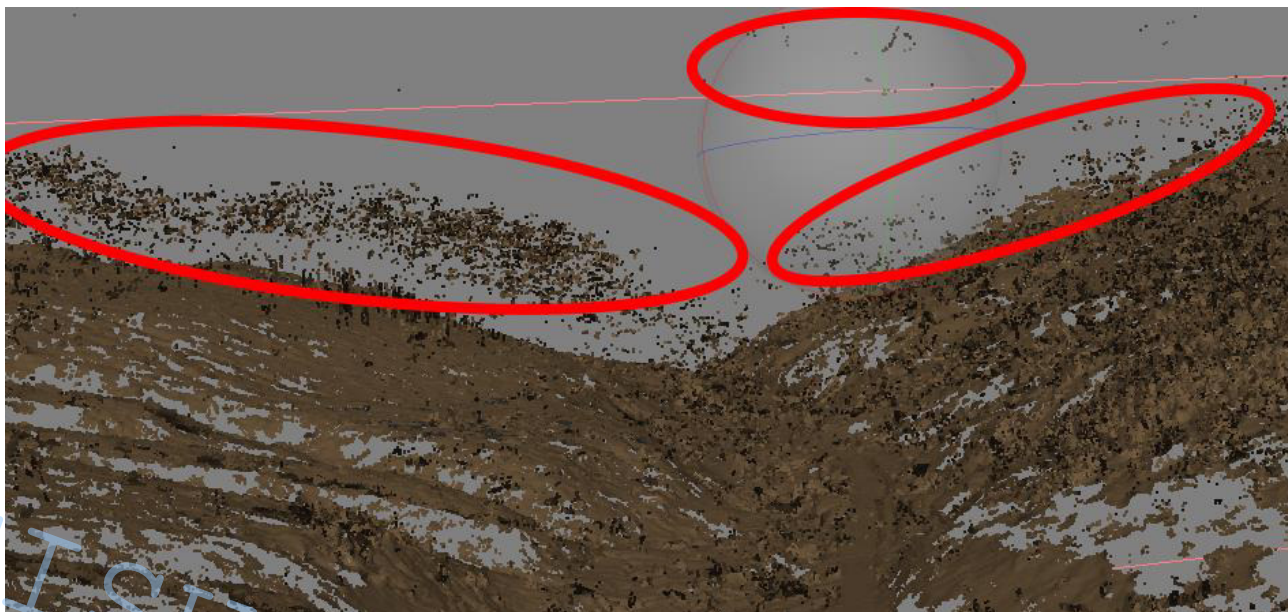


Рис. 3.2.3 Хмара точок лісу після класифікації Agisoft Metashape

При цьому класифікація хмари точок над дорогою спрацювала добре і зайвих точок майже не було (рис3.2.4).

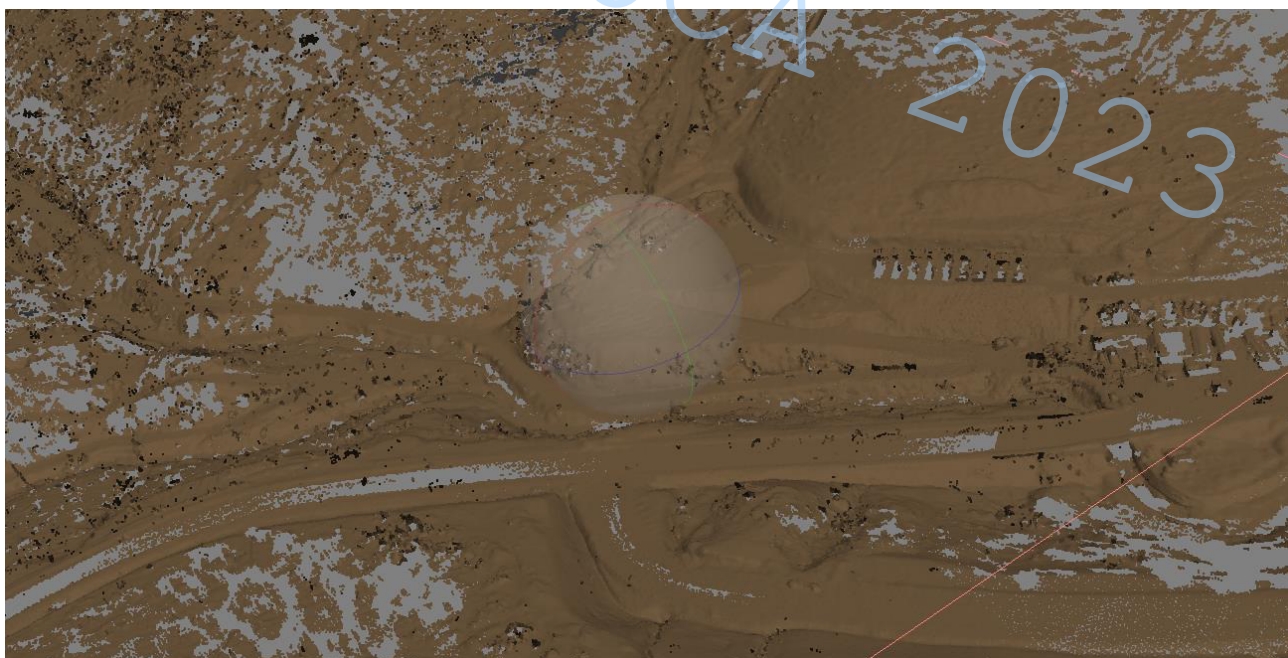


Рис. 3.2.4 Хмара точок дороги після класифікації

В CloudCompare класифікація в області дороги теж пройшла добре (рис.3.2.5)

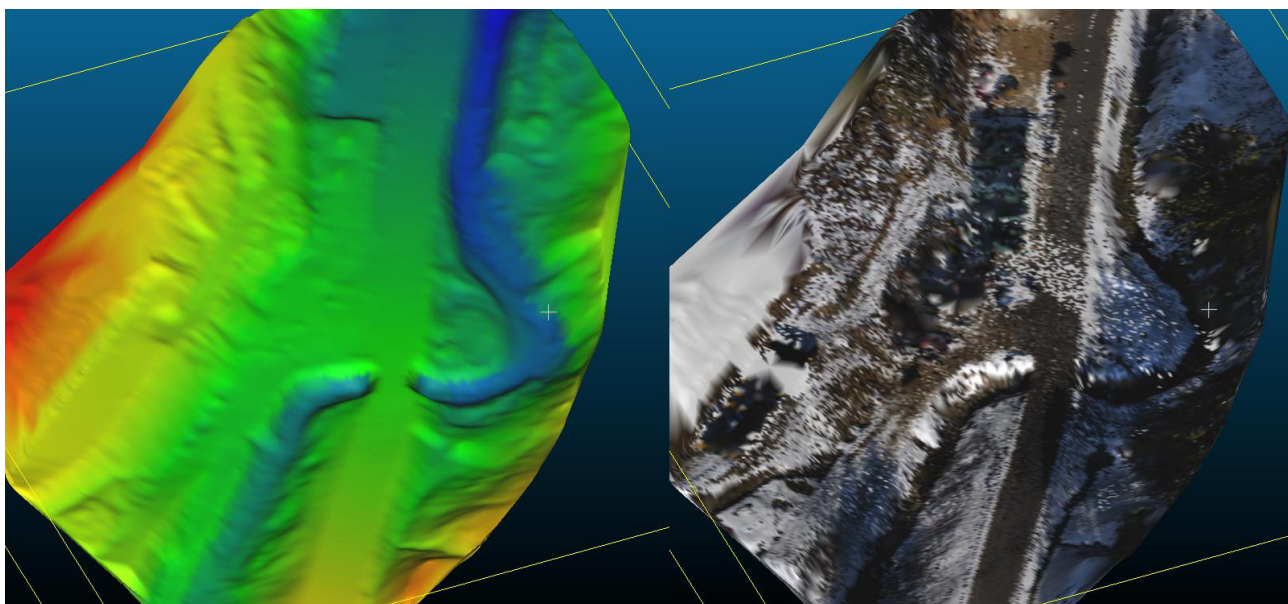


Рис. 3.2.5 Побудована модель в області дороги в CloudCompare

В лісовій частині теж вдалося отримати гарний результат, хоча і довелося довго відфільтрувати зайві точки дерев (рис.3.2.6).

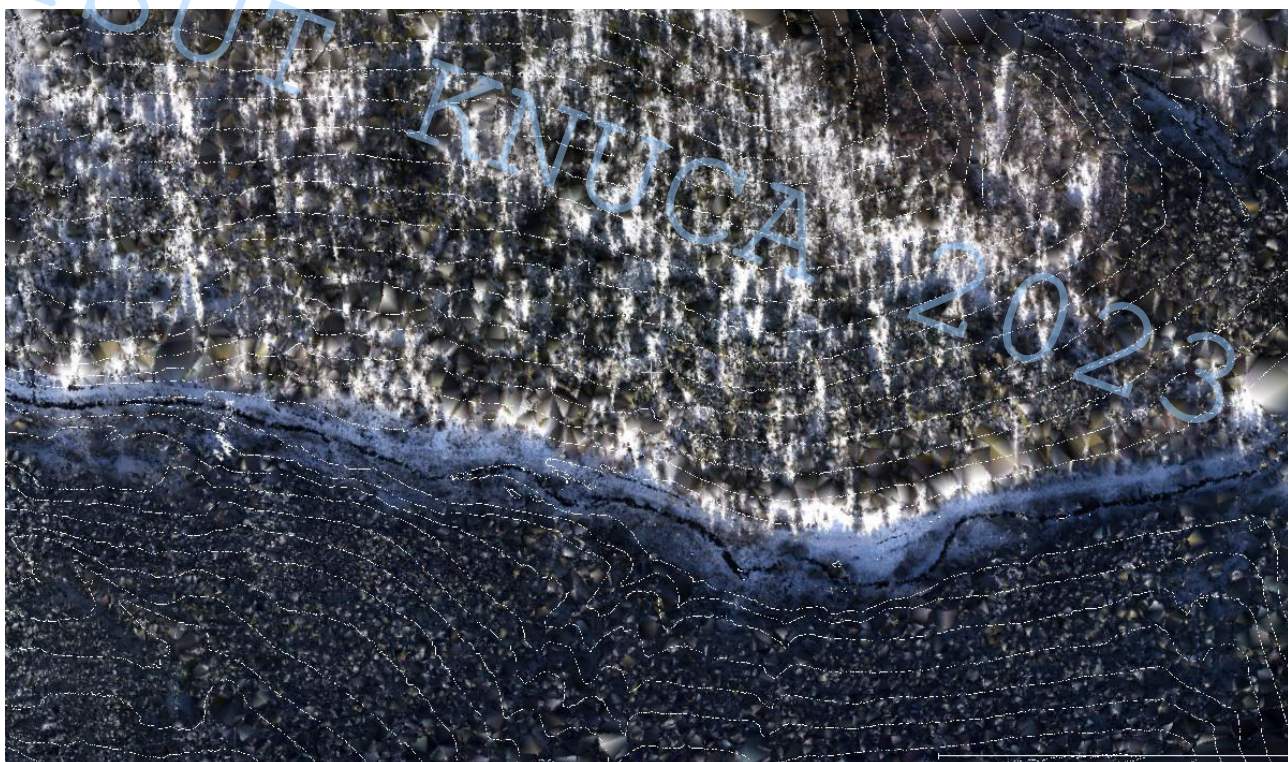


Рис. 3.2.6. Побудовані горизонталі в області лісу (CloudCompare)

В програмному комплексі QT Modeler задача виділення поверхні землі з даних лідарного БПЛА знімання виявилась найкращою як в лісовій частині (рис. 3.2.7) так і в області дороги (рис. 3.2.8)

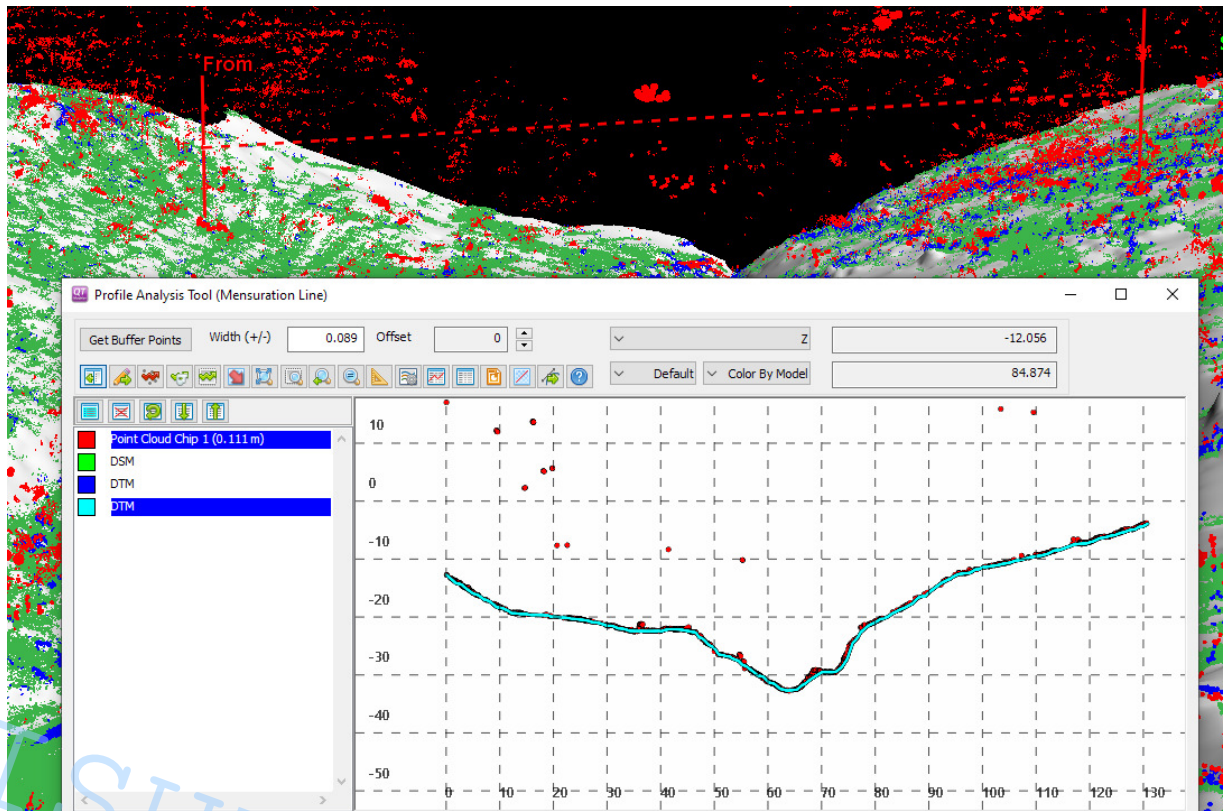


Рис. 3.2.7 Хмара точок лісу після класифікації в QT Modeler

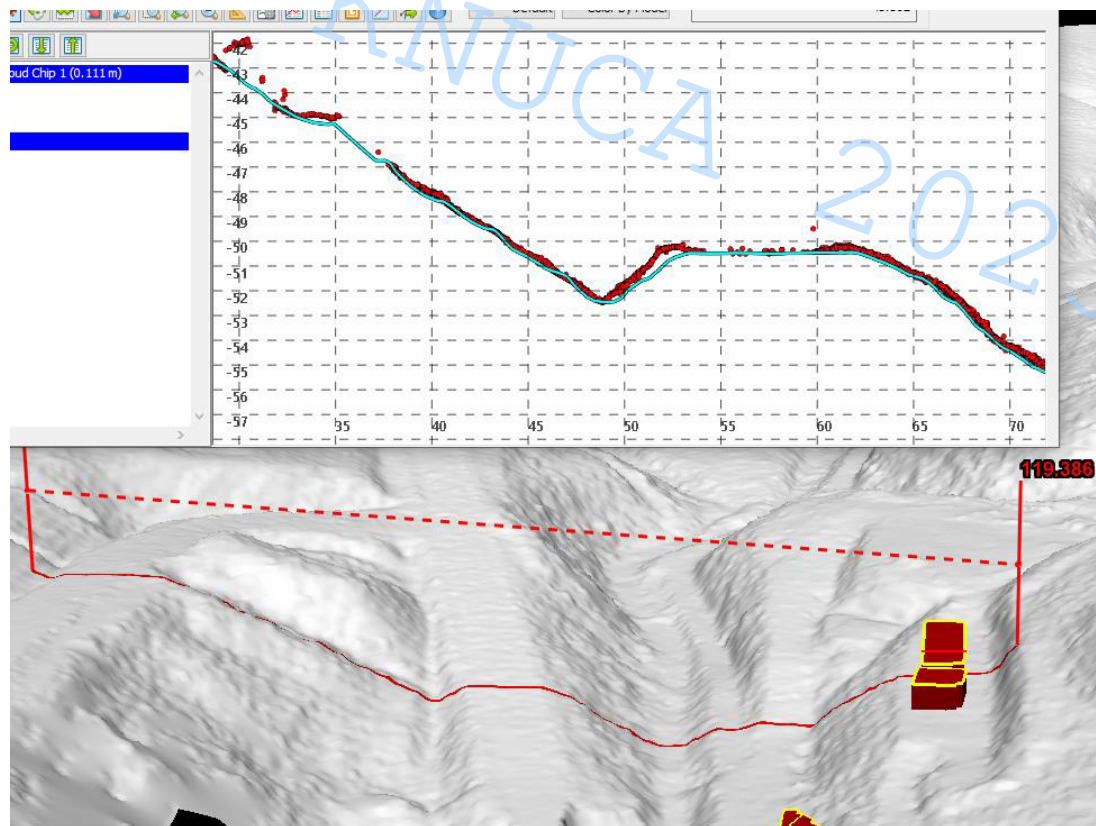


Рис. 3.2.8 Хмара точок дороги після класифікації в QT Modeler

3.3 Побудова ЦМР по даним БПЛА знімання забудованих територій

У якості вихідних даних взято результати БПЛА знімання в місті Києві території промислової забудови в районі м. Видубичі (рис.3.3.1).

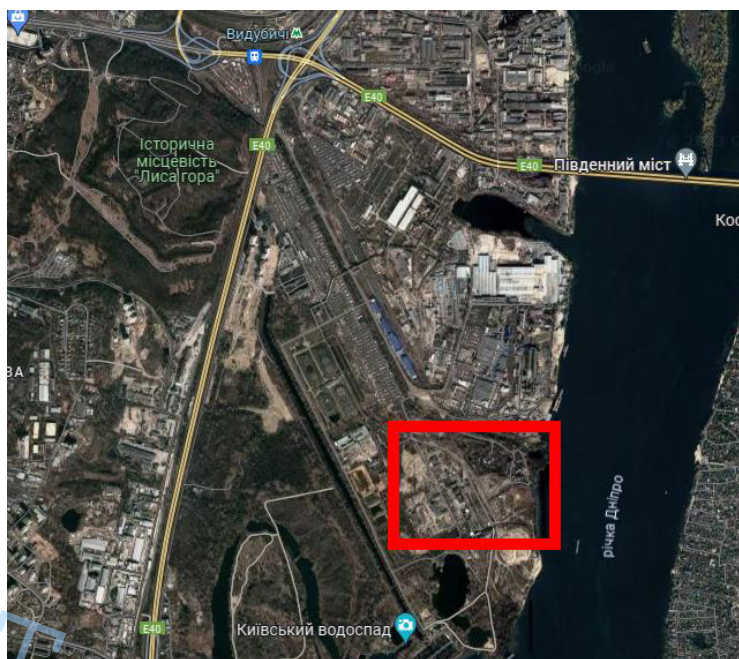


Рис. 3.3.1. Територія БПЛА знімання міської забудови

Перші результати отримано в Agisoft Metashape, так як дані БПЛА знімання опрацьовано було саме в цій програмі. Класифікація хмари точок на перший погляд пройшла успішно (рис.3.3.2)

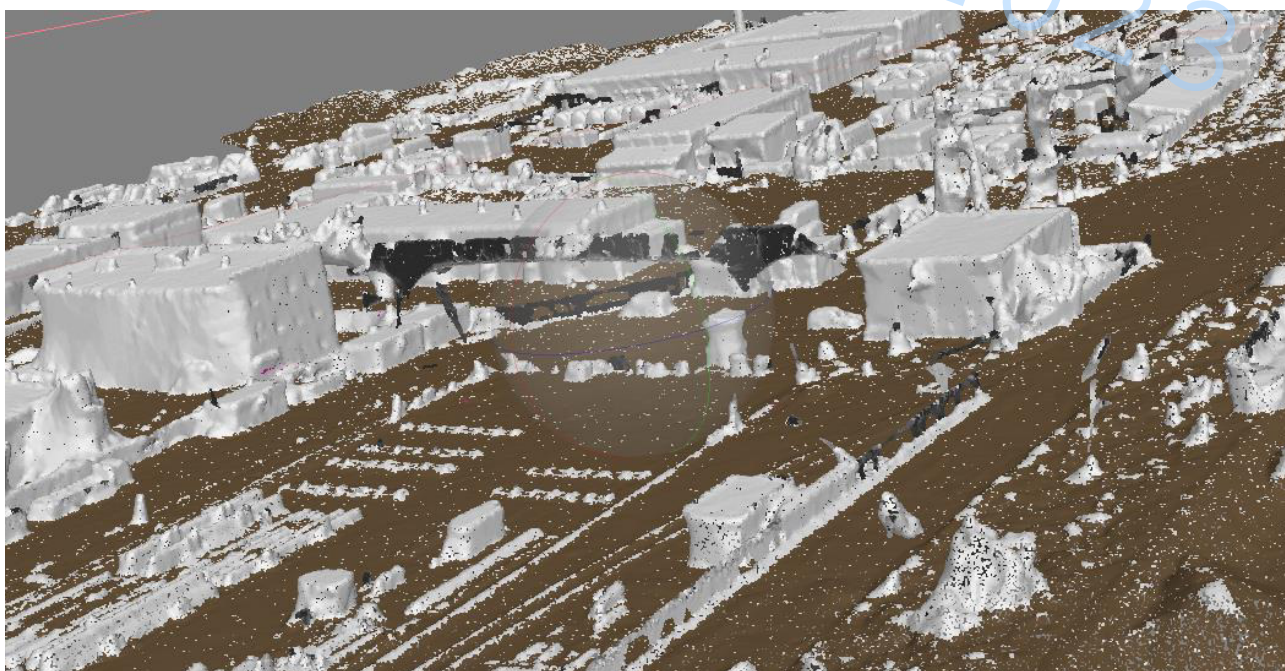


Рис.3.3.2. Класифікація хмари точок в Agisoft Metashape

По класифікованим точкам поверхні землі було побудовано ЦМР (рис3.2.3)

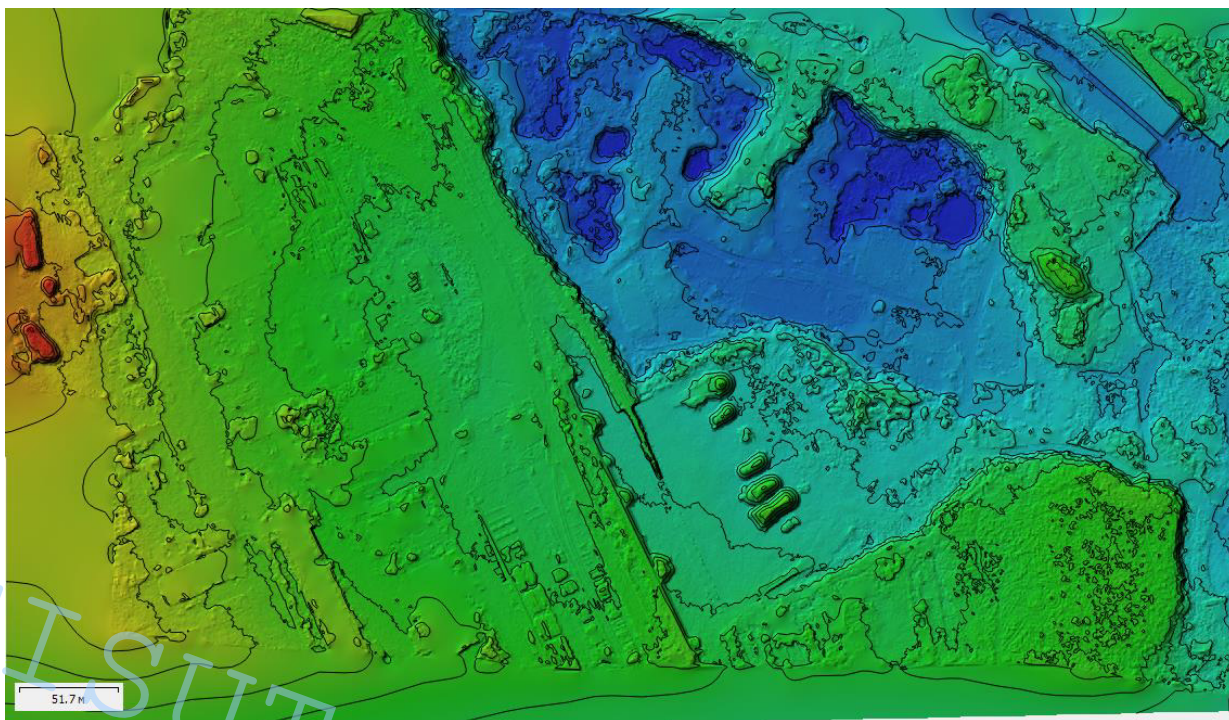


Рис. 3.3.3. Результати побудови ЦМР в Agisoft Metashape

Як видно по зображенню на ЦМР залишилось багато мілких деталей, елементів споруд та парканів, хоча основну їх частину було відділено. Це значить, що цю поверхню потрібно вивантажувати та продовжувати з нею роботу в інших програмних продуктах для згладжування цього ефекту. Хоча в основному результат можна назвати хорошим і, якщо забігати вперед, то найкращим.

Для інших програм було вивантажено щільну хмару точок з Agisoft Metashape. Подальше опрацювання було виконано в CloudCompare. На рис. 3.3.4 показано результат класифікації хмари точок землі. Як видно на рисунку в лівій його частині на споруді з'явилися червоні області, це точки які некоректно класифікувались і віднесли до поверхні землі, хоча являються точками даху будівлі. Таких вильотів було не сильно багато, але їх потрібно вичищати вручну, автоматичні алгоритми сильно проріджують загальну хмару точок в намаганнях прибрати ці вильоти.

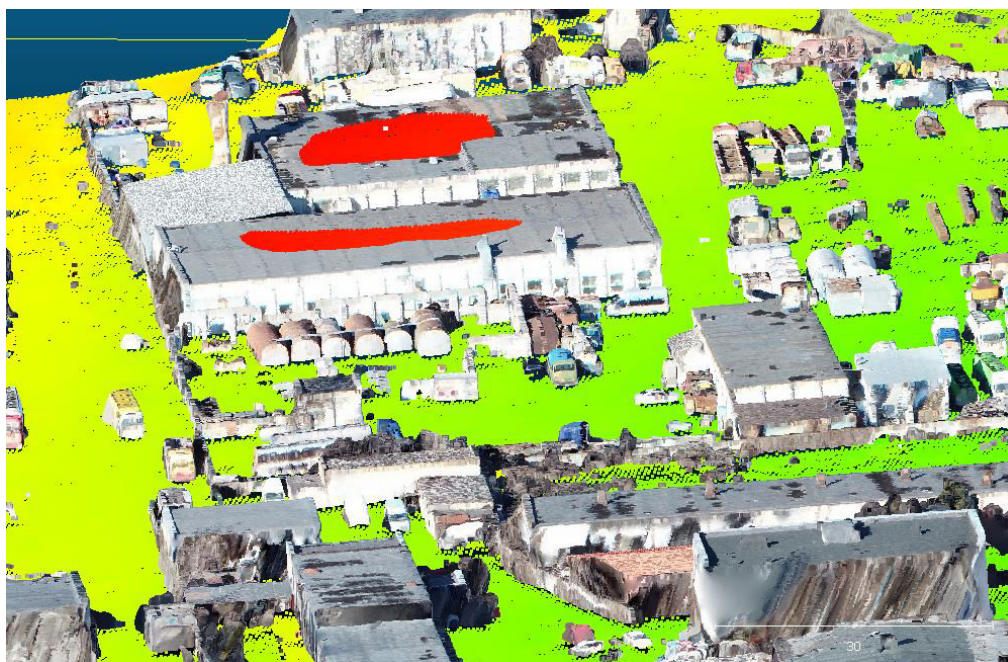


Рис.3.3.4. Класифікація хмари точок в CloudCompare

Побудована по цим даним модель та горизонталі містять ці помилкові дані, вони відмічені червоним кругом (рис.3.3.5).

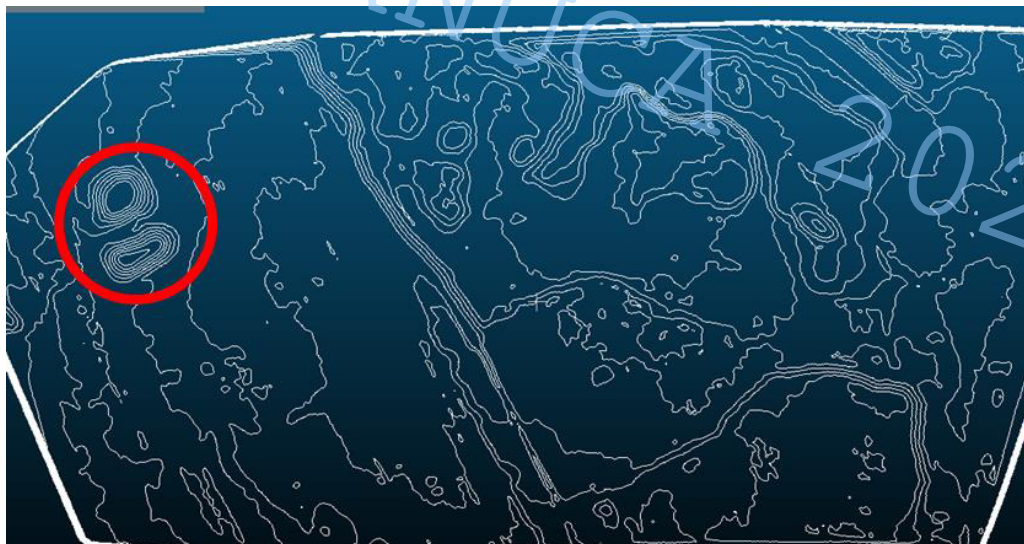


Рис. 3.3.5. Результати побудови ЦМР в CloudCompare

Загальна картина схожа на результат в Agisoft Metashape, хоча деякі елементи, наприклад купи піску в центральній частині, втрачено.

Наступною була програма фаворит з обробки лазерного сканування QT Modeler. Проте її результати виявились досить спірними. Із плюсів можна відмітити автоматичне виділення контурів споруд та покрівель (рис.3.3.6).

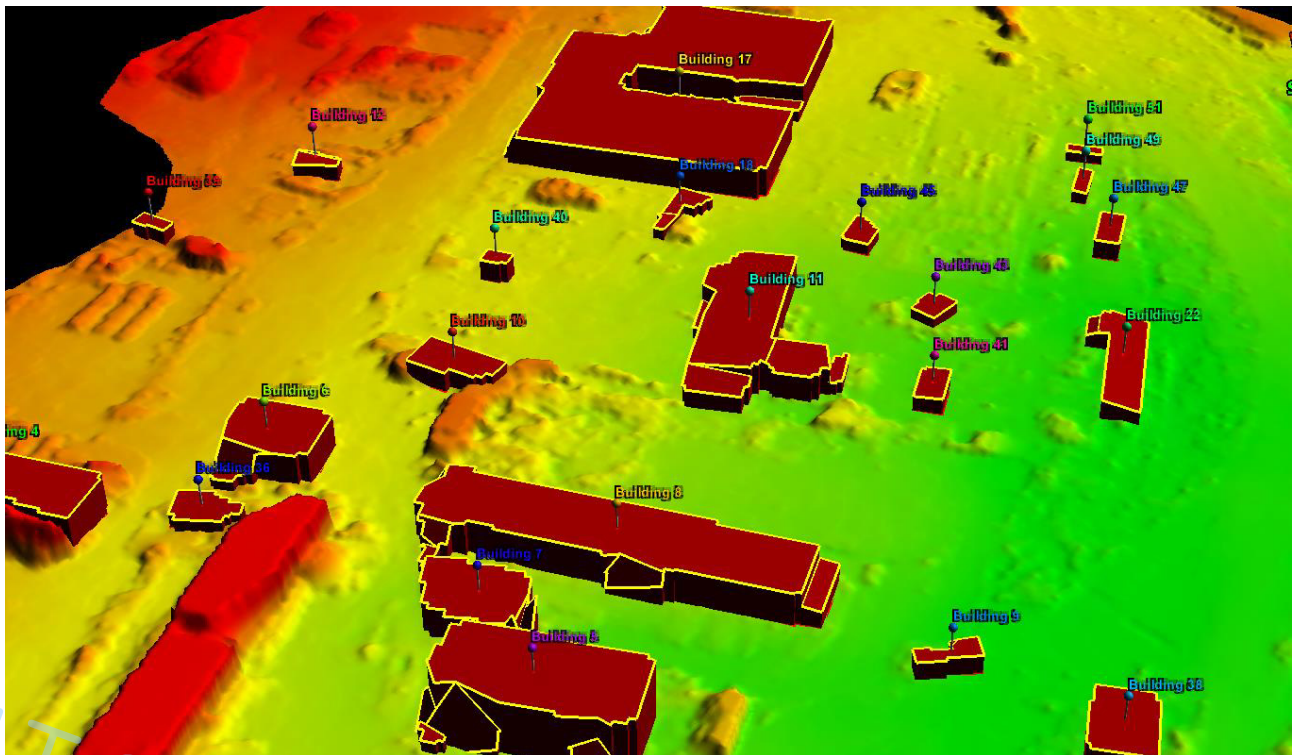


Рис.3.3.6. Виділення контурів споруд та покрівель

В частині даних алгоритм спрацював коректно і в подальшому відділив будівлі від даних землі, в частині ні і будинки залишились у вигляді пагорбів (рис.3.3.7).

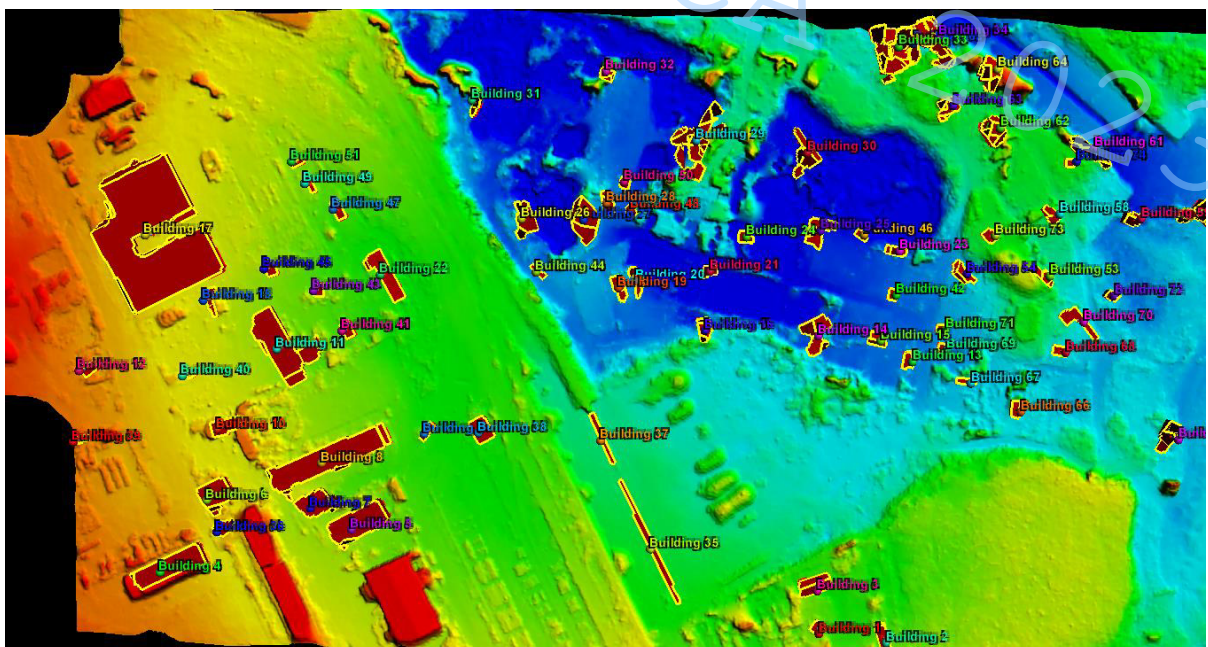


Рис.3.3.7. Неповне виділення контурів споруд та покрівель

В результаті отримана модель поверхні неоднорідно добре виконана, і потребує ручного вирізання будинків в лівій нижній та центральній частині об'єкту (рис.3.3.8).

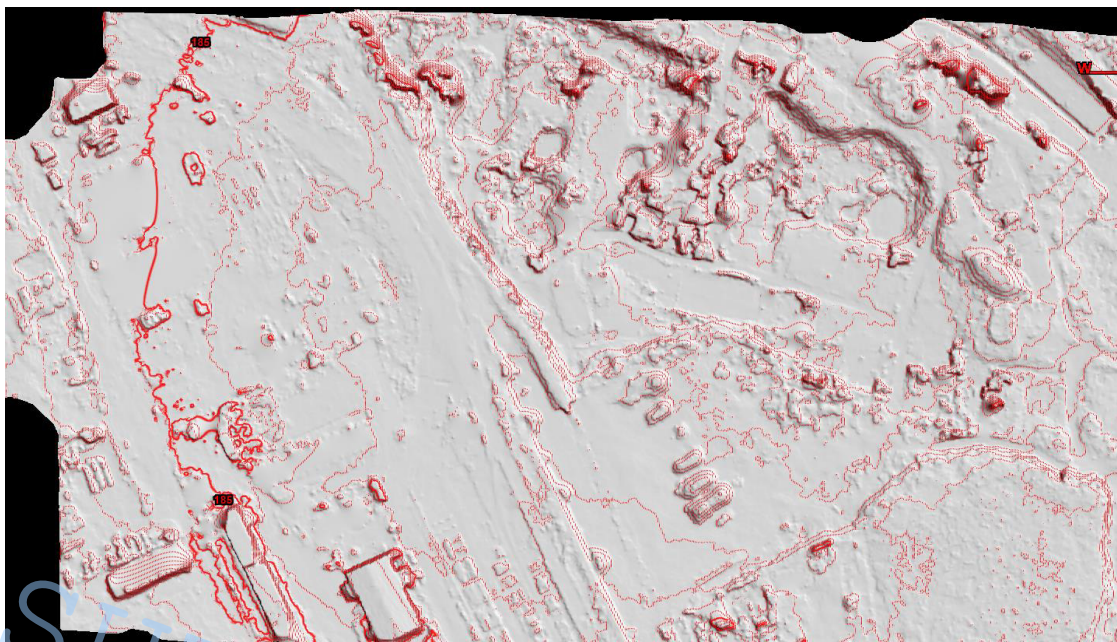


Рис. 3.3.8. Результати побудови ЦМР в QT Modeler

В результаті ручного доопрацювання та згладжування поверхні можна отримати задовільний результат (рис.3.3.9)

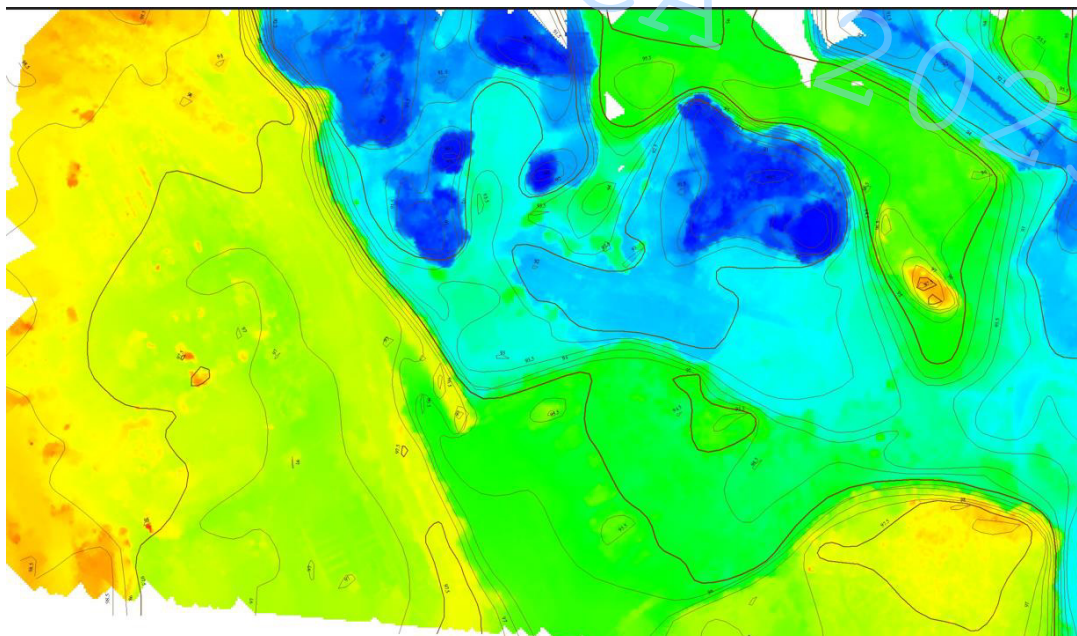


Рис. 3.3.9 Доопрацьована модель поверхні

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто методики опрацювання та виділення з хмар точок даних для побудови цифрової моделі поверхні за допомогою декількох сучасних програмних комплексів. Застосовуючи ці методики, проведено серію експериментів з різного роду даними в різних місцевостях.

Підсумовуючи результати проведених експериментів в даному розділі можна впевнено виділити фаворита в опрацюванні лідарних даних та наземного лазерного сканування серед перевірених програм. QT Modeler майже в усіх задачах справлявся з обробкою даних та показав найточнішу класифікацію. Найважче йому було виконати класифікацію даних наземного лазерного сканування на рівнинній території, хоча алгоритми побудови ЦМР «пропустили» неправильно класифіковані точки та побудували правильну поверхню.

В той же час з обробкою БПЛА знімання в складних умовах індустріальної частини міста, цей програмний продукт вже не мав такої переваги та поступився спеціалізованому засобу Agisoft Metashape, алгоритми якого певно враховують особливість отриманої хмари точок в результаті БПЛА знімання.

Незважаючи на не завжди швидкий та якісний результат без ручної роботи в CloudCompare, це програмне забезпечення являється чудовим помічником для подальшої обробки попередньо підготовлених даних, плюс саме в ньому простіше всього робити ручну зачистку хмари точок.

Також окрім якості виконання обробки даних варто звернути увагу на швидкість обробки і тут QT Modeler знову у фаворитах, швидкість завантаження, фільтрації та класифікації хмари точок помітно більша за аналогічні операції у конкурентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Четверіков Б. Методика створення ситуаційного плану Сирецького концентраційного табору за архівними аероматеріалами // «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». – Львів. – 2011. – Вип. II(22). – С.184–187.
2. Schumann, Muhlhausen, Andreadis. Rapid Mapping of Small-Scale River-Floodplain Environments Using UAV SfM Supports Classical Theory. Remote Sensing. 2019. Vol. 11, No. 8. С. 982.
3. Gabara, G., Sawicki, P. CRBeDaSet: A Benchmark Dataset for High Accuracy Close Range 3D Object Reconstruction. Remote Sensing. 2023. Vol. 15, No. 4. С. 1116.
4. Dayamit, O. M., Pedro, M. F., Ernesto, R. R., и др. DIGITAL ELEVATION MODEL FROM NON-METRIC CAMERA IN UAS COMPARED WITH LIDAR TECHNOLOGY. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. XL-1/W4, No. 1W4. С. 411–414.
5. Peterson, S., Lopez, J., Munjy, R. COMPARISON OF UAV IMAGERY-DERIVED POINT CLOUD TO TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUD. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. IV-2/W5, No. 2/W5. С. 149–155.
6. Nesbit, P., Hugenholtz, C. Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. Remote Sensing. 2019. Vol. 11, No. 3. С. 239.
7. Yeh, M. L., Chou, Y. T., Yang, L. S. The Evaluation of GPS techniques for UAV-based Photogrammetry in Urban Area. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B1. С. 1079–1084.
8. Yu, J. J., Kim, D. W., Lee, E. J., и др. Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models. Drones. 2020. Vol. 4, No. 3. С. 49.
9. Manfreda, S., Dvorak, P., Mullerova, J., и др. Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Imagery Acquired with Unmanned Aerial Systems. Drones. 2019. Vol. 3, No. 1. С. 15.

10. Tomašík, J., Mokroš, M., Saloň, Š., и др. Accuracy of Photogrammetric UAV-Based Point Clouds under Conditions of Partially-Open Forest Canopy. *Forests*. 2017. Vol. 8, No. 5. С. 151.

11. Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J., Rodríguez-Pérez, J., и др. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 10. С. 1606.

12. Канівець О.М. Застосування ГІС-технологій в геодезії [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://repo.sau.sumy.ua/bitstream/123456789/2302/1.Pdf>

13. Постельняк А. А. Оцінювання точності висот цифрових моделей рельєфу SRTM та ASTER GDEM . Вісник геодезії та картографії. 2013. №4. С.

17–21.

14. Козаченко Т. І., Курач Т. М. Геоінформаційне картографування науки та інноваційної діяльності в Україні . Вісн. геодезії та картографії. 2004. №3. С. 32-43.

15. Геоінформаційне картографування в Україні: концептуальні основи і напрями розвитку. [Л. Г. Руденко, Т. І. Козаченко, Д. О. Ляшенко, А. І. Бочковська, А. П. Дишлик, В. С. Чабанюк, В. В. Путренко]; за ред. Л. Г. Руденка. Київ, Наукова думка, 2011, 102 с.

16. Самойленко В.М. Основи геоінформаційних систем. Методологія: Навчальний посібник. Київ, Ніка-Центр, 2003. 276 с.

17. Шипулін В. Д. Основні принципи геоінформаційних систем Харків : ХНАМГ, 2012. 312 с.

18. КЛАСИФІКАЦІЯ ХМАР ТОЧОК І СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІСЦЕВОСТІ В НОВІЙ <http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2020/03/10.pdf>.

19. Хмара точок — Вікіпедія. https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%B0_%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BE%D0%BA.

20. Хмара точок - ImageToStl. <https://imagetostl.com/ua/glossary/point-cloud>.

21. Weinmann M. et al. Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2015. — T. 105. — C. 286–304.
22. Xie Y., Tian J., Zhu X. X. A review of point cloud semantic segmentation //arXiv preprint arXiv:1908.08854. — 2019.
23. Zhang J. et al. A Review of Deep Learning-based Semantic Segmentation for Point Cloud (November 2019) //IEEE Access. — 2019.
24. H. Su, S. Maji, E. Kalogerakis, and E. Learned-Miller, “Multi-view convolutional neural networks for 3D shape recognition,” in Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV), Dec. 2015, pp. 945–953
 - a. Boulch, B. Le Saux, and N. Audebert, “Unstructured point cloud semantic labeling using deep segmentation networks,” in Proc. Eurograph. Workshop 3D Object Retr., vol. 2, 2017, pp. 17–24.
25. J. Guerry, A. Boulch, B. Le Saux, J. Moras, A. Plyer, and D. Filliat, “SnapNet-R: Consistent 3D multi-view semantic labeling for robotics,” in Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV), Oct. 2017, pp. 669–678.
26. M. Jiang, Y. Wu, T. Zhao, Z. Zhao, and C. Lu, “PointSIFT: A SIFTlike network module for 3D point cloud semantic segmentation,” 2018, arXiv:1807.00652. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1807.00652>
27. Wang, Y., Sun, Y., Liu, Z., Sarma, S.E., Bronstein, M.M. and Solomon, J.M., 2019. Dynamic graph cnn for learning on point clouds. ACM Transactions on Graphics (TOG), 38(5), pp.1–12.
28. Горковчук, Д Опрацювання даних фотограмметричного знімання з БПЛА. Методичні рекомендації. 2021. КНУБА. С.24-35.

ДОДАТКИ

Додаток 1

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ПЗ – програмне забезпечення;

ЦМР – цифрова модель рельєфу;

LIDAR – (Light Detection And Ranging) – технологія дистанційного зондування;

GPS – (Global Positioning System) – система глобального позиціонування

GNSS – (Global Navigation Satellite System) – супутникова система навігації

DGN – файл креслення Microsoft

LAS – файл TerraScan

NASA – (National Aeronautics and Space Administration) - Національне агентство з авіації і космонавтики США;

EAARL – (Experimental Advanced Airborne Research Lidar) – лідар з можливістю сканувати дно

PRZEWODY – провід головної лінії

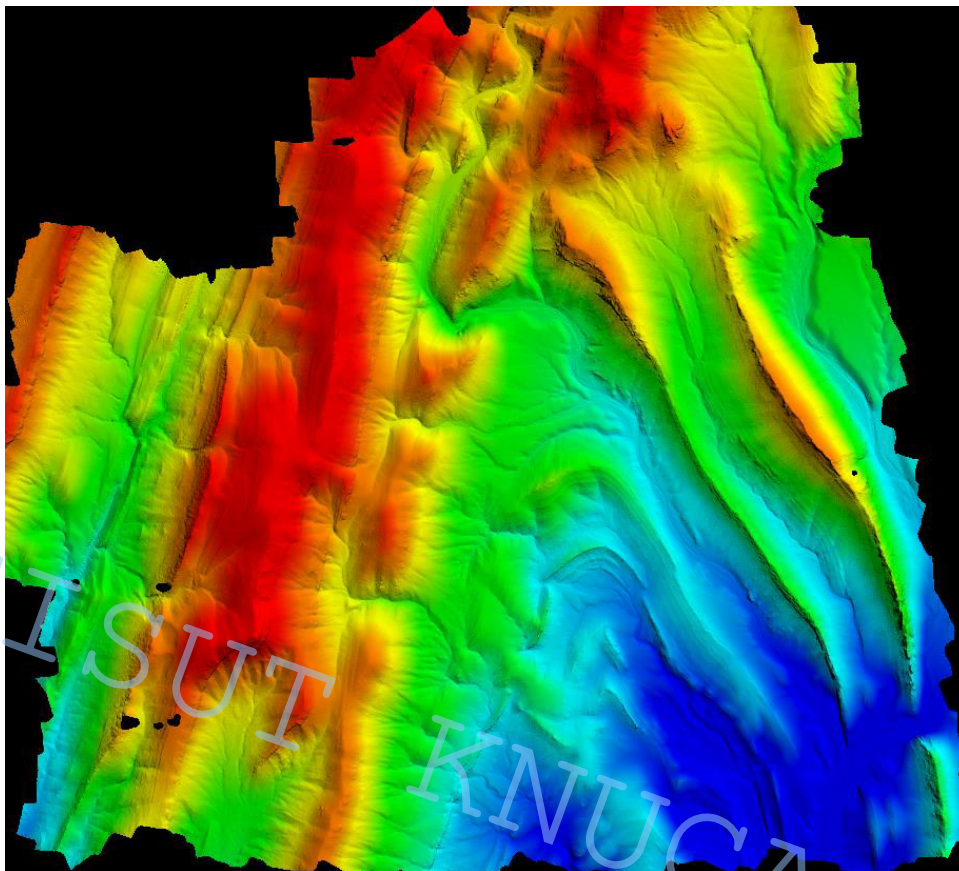
SLUPY – стовп головної лінії

KML – (Keyhole Markup Language) – мова програмування на основі XML

DEM – (Digital Elevation Model) цифрова модель рельєфу по регулярній сітці

DTM – (Digital Terrain Model) цифрове представлення рельєфу

Третя поверхня QT Modeler



Третя поверхня в горизонталях CloudCompare

