

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

**Географічний факультет
кафедра геодезії, картографії та управління територіями**

**СТВОРЕННЯ ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ
ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ ТЕРИТОРІЇ
РЕЗИДЕНЦІЇ МИТРОПОЛИТІВ БУКОВИНИ ТА ДАЛМАЦІЇ
З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ**

**Кваліфікаційна робота
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)**

Виконав:

студент_2 курсу, 208-М групи
спеціальності 193 “Геодезія та землеустрій”
ОПП “Геодезія”

Сандуляк Євгеній Станіславович

Керівник :

к.геогр.н., доц. кафедри геодезії,
картографії та управління територіями
Білокриницький С.М.

*До захисту допущено
на засіданні кафедри*

протокол № 3 від 18 листопада 2025 р.

Зав. кафедрою _____ доц. Дарчук К.В.

Чернівці – 2025

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: - студента 2 курсу, 208-М групи, спеціальності 193 "Геодезія та землеустрій" другого (магістерського) рівня вищої освіти на тему: "Створення та оцінка точності цифрової моделі рельєфу території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації з використанням ГІС-технологій".

У роботі розглянуто створення високоточної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) території резиденції митрополитів Буковини і Далмації, де нині розміщується Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. Вихідними даними слугували топографічні плани масштабів 1:2000 і 1:500, оцифровані горизонталі та висотні точки, GNSS-визначені опорні точки, а також результати тахеометричних вимірювань, виконаних електронним тахеометром Sokkia CX-55. На основі цих даних у середовищі QGIS побудовано цифрові моделі рельєфу (DEM_2000 і DEM_500), проведено їх порівняння, виконано аналіз різниць абсолютних висот і обчислено статистичні параметри (середнє відхилення, стандартне відхилення, RMSEz). Показано, що основні похибки локалізуються на периферії аркушів топопланів та у зоні господарського двору через нестачу вихідних висотних позначок.

Подальше доповнення моделі результатами тахеометричного знімання дозволило сформувати інтегровану ЦМР (DEM_final) методом TIN-інтерполяції з урахуванням лінійних (горизонталі) та точкових (репери, окремі відмітки висот) обмежень рельєфу. Точність фінальної моделі оцінена за незалежними контрольними точками: середня різниця становить близько +0.022 м, стандартне відхилення — ~0.039 м, RMSEz — ~0.044 м, що відповідає вимогам до знімань масштабу 1:500.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу (ЦМР), TIN-інтерполяція, тахеометрія, QGIS, точність.

ABSTRACT

Qualification work: - student of the 2nd year, group 208-M, specialty 193 "Geodesy and land management" of the second (master's) level of higher education on the topic: " Creation and assessment of the accuracy of a digital terrain model of

the territory of the Residence of the Metropolitans of Bukovina and Dalmatia using GIS technologies".

This work presents the development of a high-accuracy Digital Elevation Model (DEM) for the territory of the former Residence of the Metropolitans of Bukovina and Dalmatia, currently occupied by Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. The input datasets include large-scale topographic plans at 1:2000 and 1:500, digitized contour lines and spot heights, GNSS-based control points, and total station measurements acquired with a Sokkia CX-55 electronic total station. Using the QGIS environment, two preliminary DEMs (DEM_2000 and DEM_500) were generated and compared in order to assess systematic and random deviations in elevation. The elevation differences were analysed statistically (mean bias, standard deviation, RMSEz), which revealed increased uncertainty at the outer edges of the topographic sheets and within the service yard area due to insufficient height control.

Additional tachymetric measurements were then integrated to densify the height control in problematic areas. A final DEM (DEM_final) was produced via TIN interpolation that simultaneously accounts for linear constraints (contours) and point constraints (benchmarks, measured spot heights). The resulting model was validated against independent control points. The obtained mean elevation difference is approximately +0.022 m, the standard deviation is about 0.039 m, and the vertical RMSE (RMSEz) is ~0.044 m, which satisfies the accuracy requirements for 1:500-scale engineering surveys.

Keywords: Digital Elevation Model (DEM), Digital Terrain Model (DTM), TIN interpolation, total station survey, QGIS, accuracy assessment.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Сандуляк Є.С.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ І. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ (ЦМР).....	9
1.1 Створення ЦМР: актуальність, нормативна база, точність	9
1.2 Особливості створення ЦМР.....	11
1.3 Створення ЦМР і ЦММ використовуючи ГІС.....	13
Висновки до розділу 1.....	16
РОЗДІЛ ІІ. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ	17
2.1 Характеристика Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.....	17
2.2 Загальна фізико-географічна характеристика території дослідження.....	20
Висновки до розділу 2.....	23
РОЗДІЛ ІІІ. ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ЦМР ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
3.1 Створення цифрової моделі рельєфу по аркушах топоплану 1:2000 і 1:500.....	24
3.2 Порівняння цифрових моделей рельєфу	31
3.3 Використання електронного тахеометра Sokkia CX-55 для уточнення геодезичних даних при побудові ЦМР.....	36
3.4 Створення ЦМР за даними топопланів та тахеометричного знімання території досліджень.....	40
Висновки до розділу 3.....	45
ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	58

ВСТУП

Актуальність. Сучасні інженерно-геодезичні вишукування, містобудівне планування та моніторинг урбанізованих територій неможливі без високоточного опису рельєфу. Цифрова модель рельєфу (ЦМР) є базовим просторовим ресурсом для проєктування, моделювання гідрологічних процесів, оцінки деформацій земної поверхні, планування реконструкції територій та будівельних робіт. Якість і надійність ЦМР прямо впливають на прийняття інженерних рішень і вартість будівельних проєктів.

Проблема полягає в тому, що для локальних міських ділянок (дворів, внутрішньоквартальних територій, історичних ансамблів) офіційні топографічні плани нерідко мають різні масштаби, неоднорідну повноту та різну давність оновлення. Це призводить до нерівномірності щільності висотних даних і, відповідно, до зниження точності ЦМР у найбільш критичних місцях — як правило, саме там, де плануються інженерні втручання.

Досліджувана територія — резиденція митрополитів Буковини і Далмації (нині Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича), зокрема господарський двір. Ця ділянка є об'єктом культурної спадщини національного значення та об'єктом із потенційними будівельними / реконструкційними роботами. Це вимагає максимально точної моделі рельєфу з похибкою, прийнятною щонайменше для масштабу 1:500.

Важливість дослідження полягає в тому, що робота демонструє технологію об'єднання даних різної природи (топоплани масштабу 1:2000 і 1:500, висотні точки, репери, тахеометричні вимірювання, GNSS-координати) в єдиній системі координат; — показує, як у середовищі ГІС (QGIS) побудувати інтегровану ЦМР методом TIN; дає кількісну оцінку точності моделі у вигляді СКП та діапазону відхилень, і тим самим доводить її придатність для інженерних цілей.

Результати мають прикладне значення для локального геодезичного забезпечення університетської території, для контролю рельєфу перед будівництвом і для просторового моніторингу стану історичних об'єктів.

Мета дослідження - створити високоточну цифрову модель рельєфу (ЦМР) території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації з використанням ГІС-технологій та геодезичних вимірювань і виконати кількісну оцінку точності цієї моделі (СКП).

Об'єкт дослідження - урбанізована територія резиденції митрополитів Буковини і Далмації (Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича), зокрема господарський двір та прилеглі ділянки, які є зоною потенційних будівельних втручань.

Предмет дослідження - технологія побудови, узгодження і перевірки точності цифрової моделі рельєфу на основі різномірних висотних даних: топографічних планів масштабів 1:500 та 1:2000, оцифрованих горизонталей і висотних позначок, GNSS-визначених опорних точок та тахеометричних вимірювань електронним тахеометром Sokkia CX-55.

У ході виконання роботи виконано наступні завдання:

- зібрати та підготувати вихідні просторові дані: аркуші топопланів 1:2000 і 1:500, висотні точки, реperi, тахеометричні вимірювання, GNSS-координати. Виконати геоприв'язку растрових топопланів за опорними точками та ортофотознімком високої роздільної здатності.
- створити цифрові моделі рельєфу для кожного масштабу окремо (DEM_2000, DEM_500) методом TIN-інтерполяції та порівняти їх.
- провести тахеометричне уточнення у проблемних зонах (господарський двір), отримати додаткові контрольні точки по висоті та створити інтегровану ЦМР, оцінити її точність.

Методи дослідження. Геодезичні методи високоточного знімання: тахеометричні вимірювання електронним тахеометром Sokkia CX-55, використання GNSS-координат контрольних точок. Геоінформаційні методи:

геоприв'язка растрових топопланів у QGIS, оцифрування горизонталей і висотних позначок, побудова TIN-інтерполяційної моделі рельєфу, растровий аналіз різниць. Аналітико-статистичні методи: обчислення різниць висот між DEM та контрольними точками, розрахунок середньої похибки, стандартного відхилення (СКП) та кореня середньоквадратичної похибки RMSEz. Візуально-інтерпретаційні методи: перевірка просторової логіки рельєфу (схили, пониження, бордюри, насипи), локалізація аномалій на межах моделей.

Наукова новизна:

- запропоновано локальну методику інтеграції різномасштабних топографічних даних (1:2000 і 1:500) з інженерно-геодезичними польовими вимірюваннями (тахеометричними і GNSS) для побудови детальної ЦМР в умовах щільної історичної забудови.

- показано, що поєднання оцифрованих горизонталей та точкових абсолютних відміток з тахеометричними висотами дозволяє суттєво зменшити похибку моделі в проблемних зонах, де відсутні повні дані топопланів.

- для конкретної урбанізованої території (господарський двір ЧНУ) експериментально доведено досяжність середньоквадратичної похибки висоти RMSEz на рівні близько 0.04–0.05 м, що відповідає вимогам топографічних знімань масштабу 1:500.

Практичне застосування. Побудована фінальна ЦМР може бути використана для планування будівельних та інженерних робіт у господарському дворі ЧНУ імені Юрія Федьковича, включно з оцінкою ухилів, організацією поверхневого водовідведення, розрахунком земляних робіт.

Результати можуть бути інтегровані в ГІС університету як актуальний висотний шар для просторового менеджменту території.

Методика може застосовуватися кафедрою геодезії, картографії та управління територіями як навчально-практична схема організації геодезичного супроводу реконструкцій в історично цінних, складних для знімання локаціях.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків до розділів, висновків загальних та списку використаних джерел. Робота представлена на 49 сторінках формату А4. Список використаної літератури містить 20 найменувань.

РОЗДІЛ І. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ (ЦМР)

1.1 Створення ЦМР: актуальність, нормативна база, точність.

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР, англ. *Digital Elevation Model — DEM*) є фундаментальним компонентом сучасних геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі, кадастрових і інженерно-геодезичних робіт. Їх побудова забезпечує кількісне, просторове і візуальне відображення морфології поверхні Землі, що дозволяє виконувати аналітичні та проєктні задачі з високою точністю.

Актуальність створення ЦМР зумовлена потребою:

- у точному відтворенні рельєфу для містобудівного і територіального планування;
- у моделюванні гідрологічних процесів (затоплення, дренаж, водозбірні басейни);
- у створенні тривимірних моделей забудови та реконструкцій територій;
- у високоточному визначенні об'ємів земляних мас, аналізі укосів, доріг, русел;
- у геомоніторингу і контролі деформацій (зсуви, осідання, просадки);
- у комплексній оцінці природного середовища.

Таким чином, ЦМР — це основа для інтеграції геодезичних, картографічних, дистанційних і геоінформаційних технологій, що підвищує ефективність управління територіями на всіх рівнях — від локального до державного.

Цифрова модель рельєфу — це математичне, цифрове або графічне представлення поверхні землі у вигляді регулярної сітки висотних значень (grid) або нерегулярної трикутної сітки (TIN), що описує просторову змінність абсолютних висот.

За структурою даних ЦМР поділяють на:

- Raster DEM (Grid) — регулярна матриця висот, де кожен піксель має одне значення висоти.
- TIN (Triangulated Irregular Network) — поверхня, побудована з трикутників, вершини яких мають координати (X, Y, Z).
- Contour-based DEM — побудована за горизонталями з топографічних карт.

За змістом розрізняють:

- Digital Surface Model (DSM) — модель усіх об'єктів (будівлі, рослинність);
- Digital Terrain Model (DTM) — модель "чистої" земної поверхні без об'єктів.

В Україні створення цифрових моделей рельєфу регламентується низкою нормативних документів:

1. ДСТУ Б Б.1.1-17:2013 — *Склад та зміст топографічних планів* (визначає точність висот для масштабів 1:500–1:10000).
2. ДСТУ ISO 19123:2012 — *Географічна інформація. Схеми покриттів* (опис цифрових сіток).
3. ДСТУ ISO 19107:2015 — *Географічна інформація. Просторові схеми* (модель геометричних об'єктів).
4. Інструкція з топографо-геодезичних робіт при створенні та оновленні топографічних планів масштабів 1:500–1:5000 (затверджена наказом Держгеокадастру).
5. Європейські стандарти INSPIRE Directive (2007/2/EC) — визначають структуру, метадані та точність просторових даних, зокрема висотних моделей.

У геодезичній практиці ЦМР створюють відповідно до класів точності (Табл.1.1):

Таблиця 1.1

Вимоги, щодо точності створення ЦМР

Масштаб плану	Середня квадратична похибка по висоті (RMSEz)
1:500	≤ 0.05 м
1:1000	≤ 0.10 м
1:2000	≤ 0.20 м
1:5000	≤ 0.50 м

1.2. Особливості створення ЦМР

Для формування цифрових моделей рельєфу використовують різні види висотної інформації:

- топографічні плани і карти (горизонталі, висотні точки, репери);
- тахеометричні вимірювання (електронні тахеометри, GNSS-станції);
- аерофотознімання та фотограмметричні моделі;
- лазерне сканування (LiDAR);
- супутникові моделі (SRTM, ASTER GDEM, Copernicus DEM, TanDEM-X);
- UAV-знімання (Structure-from-Motion з дронів).

Поєднання різних джерел забезпечує підвищення точності й повноти опису рельєфу.

Основні методи побудови ЦМР:

1. Інтерполяційні (на основі регулярної сітки точок):
 - *IDW (Inverse Distance Weighted)* — обернено-пропорційно до відстані;
 - *Spline* — гладка поверхня через усі точки;
 - *Kriging* — геостатистична інтерполяція з урахуванням просторової кореляції.

2. Триангуляційні (TIN) — побудова нерегулярної сітки трикутників між точками та лініями рельєфу.
3. Фотограмметричні — автоматичне створення DEM із пар знімків або ортофото.
4. Гібридні — поєднання різних методів (наприклад, TIN + LiDAR + GNSS).

Оцінка точності цифрової моделі рельєфу

Для оцінки якості ЦМР застосовуються кількісні показники:

- середнє відхилення (Mean Error) — систематична складова;
- стандартне відхилення (СКП) — випадкова складова;
- RMSEz (Root Mean Square Error) — узагальнений показник точності за формулою:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{DEM,i} - h_{true,i})^2}{n}} \quad (1)$$

Де $h_{DEM,i}$ — висота за ЦМР,
 $h_{true,i}$ — висота за тахеометричними або GNSS-вимірами,
 n — кількість контрольних точок.

У практиці топографічних робіт точність DEM приймають задовільною, якщо:

$$RMSE_z \leq 0.1 \cdot h_{contour} \quad (2)$$

Де: $h_{contour}$ — висота перерізу горизонталей.

Питання теорії, точності та оптимізації методів побудови цифрових моделей рельєфу розглянуті у працях вітчизняних і зарубіжних науковців:

- В. Л. Кисельов, В. В. Кисіль (2015) — застосування TIN-моделей у кадастрових роботах;
- М. С. Лісовський (2019) — точність DEM при UAV-зніманні;

- С. Л. Кравченко, І. П. Драч (2020) — алгоритми створення DEM у QGIS;
- Burrough & McDonnell (2018) — *Principles of Geographical Information Systems*;
- Li, Zhu, & Gold (2005) — *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*;
- Hengl & Reuter (2011) — *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*.

1.3 Створення ЦМР і ЦММ використовуючи ГІС

Плагін OpenTopography DEM Downloader у QGIS є інтерфейсом до сервісу <https://opentopography.org>, який надає доступ до відкритих глобальних та регіональних цифрових моделей рельєфу (DEM), створених на основі різних місій дистанційного зондування Землі (LiDAR, SAR, стереознімки тощо).

Після вибору регіону плагін зазвичай пропонує кілька наборів даних — кожен має власний рік створення, роздільну здатність і метод отримання.

При оцінці території та її рельєфу у ретроспективному аналізі важливо здійснювати порівняння ЦММ з ЦММ, а ЦМР з ЦМР. Також варто звертати увагу на період за який зібрано дані.

Модель SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) відображає рельєф земної поверхні станом на лютий 2000 року, тобто для того часу, коли існували об'єкти, зафіксовані місією.

SRTM була радарною місією NASA, яка тривала з 11 по 22 лютого 2000 року. Вона за допомогою інтерферометричного радара (C-band) вимірювала висоти поверхні Землі, отримуючи тривимірну модель — Digital Surface Model (DSM), тобто висоту верхньої частини земної поверхні разом із об'єктами: рослинністю (лісами, кущами), будівлями, спорудами тощо.

SRTM показує рельєф таким, яким він був у 2000 році.

Тобто:

- нові дороги, кар'єри, дамби, насипи, нова забудова після 2000 р. не враховані;
- рельєфна форма (пагорби, долини, русла річок) зберігає реальну геоморфологію;
- у місцях густої рослинності або лісу висоти можуть бути трохи завищеними (радар "бачив" верхівки дерев, а не ґрунт).

У наукових текстах зазвичай пишуть так:

«Цифрова модель рельєфу побудована на основі даних SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), отриманих у лютому 2000 року, що відображають стан рельєфу території на момент зйомки.» або коротше: «SRTM DEM (2000 р.) — цифрова модель поверхні, створена за результатами радарної місії NASA.»

Тому вірно говорити і казати що дані SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) належать до ЦММ а не до ЦМР.

SRTM насправді є Digital Surface Model (DSM) — тобто цифровою моделлю місцевості, бо вона включає висоти об'єктів, які стояли на поверхні у 2000 році (будівлі, дерева тощо). Тому правильно говорити: «На основі даних SRTM (2000 р.) побудовано цифрову модель місцевості (ЦММ) для території дослідження.»

У наукових роботах формулюють наступним чином: “Дані SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 2000 р.) відображають цифрову модель місцевості (DSM), що містить висотну інформацію не лише про рельєф ґрунтової поверхні, а й про рослинний покрив і антропогенні об'єкти. Тому побудована модель характеризує загальний вигляд місцевості на момент зйомки.”

Copernicus DEM (EU-DEM / GLO-30 / GLO-90) - це продукт Європейського космічного агентства (ESA) та програми Copernicus, створений на основі даних місії TanDEM-X (DLR + Airbus Defence and Space). Він поширюється у двох основних варіантах:

- Copernicus GLO-30 — глобальний DEM з роздільною здатністю 30 м,
- Copernicus GLO-90 — спрощена версія 90 м.

Тип моделі Copernicus DEM - позиціонується як: Digital Elevation Model (DEM), що є наближеною до Digital Terrain Model (DTM), тобто — це фактично цифрова модель рельєфу (ЦМР), а не місцевості. При формуванні Copernicus DEM із даних радарної місії TanDEM-X було проведено автоматичну фільтрацію дерев, будівель і споруд, щоб відобразити поверхню ґрунту, а не вершини об'єктів.

Отже SRTM (30 м) → ЦММ (DSM) — показує поверхню з об'єктами станом на 2000 рік. Copernicus DEM (GLO-30 або GLO-90) → ЦМР (DTM) — відображає рельєф земної поверхні без будівель і дерев, побудований за даними 2011–2020 рр., оприлюднений у 2021 р.

Для території України найчастіше використовують:

- Copernicus DEM (EU-DEM) — найновіший, створений на базі даних TanDEM-X (2011–2020), оновлений у 2021 році, роздільна здатність 30 м.
- SRTM (2000) — класичний і стабільний, але застарілий (понад 20 років).
- ASTER GDEM (2000–2013) — має вищу деталізацію, але часто з артефактами.

Тип моделі (ЦМР чи ЦММ) потрібно обов'язково узгоджувати при порівнянні, інакше результати будуть методологічно некоректні.

Порівнювати можна тільки моделі одного типу: ЦММ (DSM) ↔ ЦММ (DSM) — оцінка змін на поверхні місцевості (забудова, ліс, споруди, антропогенні зміни). ЦМР (DTM) ↔ ЦМР (DTM) — оцінка реальних змін рельєфу ґрунтової поверхні (кар'єри, насипи, ерозія, обвал, терасування тощо).

Наступні набори в OpenTopography можна вважати ЦММ (DSM). Це моделі, що показують висоту поверхні з усіма об'єктами.

Отже, для порівняння між роками ЦММ ↔ ЦММ можна брати: SRTM (2000) ↔ ALOS World 3D (2006–2011) або ↔ ASTER GDEM (2000–2013). Це дозволяє об'єктивно бачити антропогенні зміни місцевості (наприклад, появу забудови, зменшення лісів, кар'єри тощо).

Набори даних, що вважаються ЦМР (DTM). Це моделі, очищені від об'єктів — показують саме поверхню ґрунту.

Для ЦМР ↔ ЦМР порівнянь рекомендується: Copernicus DEM (2021) ↔ FABDEM (2000–2021). Так можна отримати об'єктивну картину змін рельєфу (а не забудови) між періодами.

Таким чином залежно від мети дослідження та типу моделей можна здійснювати порівняння між наступними джерелами даних.

Таким чином в OpenTopography існують наступні джерела даних.

Серед наявних джерел для найбільш об'єктивної оцінки можна використати SRTM 30 m (2000) ↔ Copernicus Global DSM 30 m (2011–2020) — це найбільш коректне порівняння ЦММ з ЦММ із різницею у два десятиліття. Серед наявних джерел для найбільш об'єктивної оцінки можна використати FABDEM (2000 очищений 2021) ↔ Copernicus DEM GLO-30 (2011–2020) — це найоб'єктивніше порівняння ЦМР з ЦМР.

Висновки до розділу 1. Створення цифрової моделі рельєфу — це ключовий етап сучасних геодезичних, картографічних і проектних досліджень. Від точності побудови ЦМР залежить достовірність подальших аналітичних результатів: розрахунків ухилів, водозборів, інженерних об'ємів і зон ризику.

Використання інтегрованих джерел даних (топоплани, тахеометрія, GNSS, ортофото, LiDAR) у поєднанні з сучасними алгоритмами інтерполяції в середовищі ГІС забезпечує досягнення метричної точності, яка повністю відповідає вимогам державних стандартів і міжнародних норм INSPIRE.

РОЗДІЛ II. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Територією дослідження в дипломній роботі є територія під Резиденцією митрополитів Буковини і Далмації (нині — Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича), розташована в центральній частині міста Чернівці за адресою вул. Коцюбинського, буд.2. На території центральної частини ЧНУ імені Ю.Федьковича розташовано три корпуси: 4-6 корпуси, позаду 5 корпусу знаходиться дендрологічний парк. Парк резиденції та паркові будівлі є пам'яткою архітектури національного значення (ох. № 778/5) з 24 серпня 1963 року. Дендропарк, площею близько 5 га, було сплановано у ландшафтному стилі одночасно з резиденцією. (Рис.2.1).

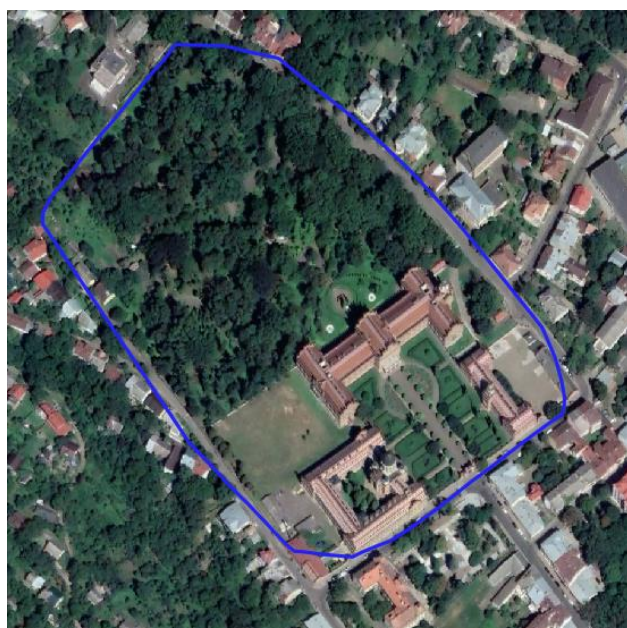
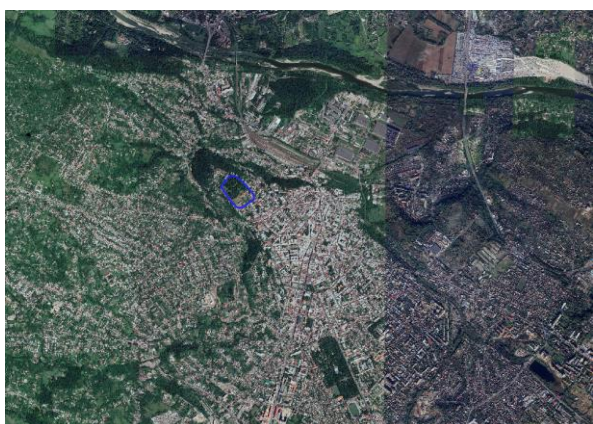




Рис.2.1 Резиденція митрополитів Буковини і Далмації (нині — Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича)

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (скорочено — ЧНУ) — один із найстаріших і найавторитетніших класичних університетів України, розташований у місті Чернівці, адміністративному центрі Чернівецької області. Заснований у 1875 році як Університет імені Франца-Йосифа I, нині він є провідним науково-освітнім, культурним і духовним центром Західної України.

З 2011 року комплекс головного корпусу університету — колишня Резиденція митрополитів Буковини і Далмації — внесений до Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, що підкреслює його виняткову історико-архітектурну та культурну цінність.

Історична довідка

- 1875 р. — створено Чернівецький університет як німецькомовний імператорський вищий навчальний заклад Австро-Угорської імперії.
- У складі університету діяли три факультети: богословський, юридичний та філософський.
- 1918–1940 рр. — після входження Північної Буковини до складу Румунії університет функціонував як Румунський університет ім. Короля Кароля I.
- 1940 р. — відновлення роботи вже як державного українського університету у складі СРСР.

- 1989 р. — університету присвоєно ім'я українського письменника Юрія Федьковича.
- 2000 р. — отримав статус національного.
- 2011 р. — головний корпус (Резиденція митрополитів) включено до Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО.
- Сьогодні — це сучасний класичний університет європейського зразка, інтегрований у міжнародний науково-освітній простір.

Структура та освітня діяльність

ЧНУ — багатoproфільний заклад вищої освіти IV рівня акредитації, у складі якого:

- 11 факультетів, серед яких: географічний, фізичний, філологічний, історичний, економічний, юридичний, педагогічний, медичний тощо;
- Інститут біології, хімії та біоресурсів,
- Коледж ЧНУ,
- Науково-дослідні інститути й центр післядипломної освіти.

Освітній процес здійснюється за понад 90 освітніми програмами рівнів бакалавра, магістра, доктора філософії.

Університет має понад 15 000 студентів і понад 1 000 науково-педагогічних працівників, серед яких понад 100 докторів і 500 кандидатів наук.

Географічний і геодезичний напрям. Особливе місце в університеті займає Географічний факультет, який об'єднує кафедри:

- геодезії, картографії та управління територіями;
- географії України та регіоналістики;
- фізичної географії, геоморфології та палеогеографії;
- географії та менеджменту туризму;
- економічної географії та екологічного менеджменту

Кафедра геодезії, картографії та управління територіями — одна з найактивніших у напрямі просторового аналізу, моделювання рельєфу, ГІС-технологій, дистанційного зондування Землі та кадастрових досліджень.

На кафедрі ведеться підготовка здобувачів за спеціальністю «Геодезія та землеустрій» на рівнях бакалавра й магістра, у тому числі практико-орієнтовано.

Архітектурно-просторна характеристика. Головний корпус університету — Резиденція митрополитів Буковини і Далмації (архітектор Йозеф Главка, 1864–1882 рр.). Це архітектурний ансамбль у неовізантійсько-романському стилі з елементами мавританського та готичного декору. До складу комплексу входять:

- Головний корпус (колишній будинок митрополита);
- Семінарський корпус;
- Церква Трьох Святителів;
- Ботанічний сад;
- Господарський двір і парк.

Загальна площа території — близько 12 га, висотні позначки — від 240 м до 254 м н.р.м.

2.2 Загальна фізико-географічна характеристика території дослідження

Резиденція митрополитів Буковини і Далмації — нині головний корпус Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича — розташована у центральній частині м. Чернівці, на високому плато правобережжя річки Прут, у межах історичного району Гореча–Садгора–Центр. Координати центральної частини комплексу: $X \approx 5342400$ м, $Y \approx 2257500$ м (СК-63, зона 7; або $48^{\circ}17'28''$ пн. ш., $25^{\circ}56'10''$ сх. д. — у WGS 84). Абсолютні висоти поверхні — від 240 до 255 м над рівнем Балтійського моря.

Територія резиденції розташована в межах Прут-Сіретського міжріччя, у межах північної частини Передкарпатського краю. Місцевість має хвилястий денудаційно-аккумулятивний рельєф, сформований на лесових

відкладах плейстоцену, які перекривають піски й суглинки неогенового віку. Поверхня території університету являє собою слабо нахилене плато з загальним падінням на південний схід (3–5 °). Перепади висот у межах господарського двору та прилеглих ділянок становлять до 5–7 м. Рельєф відзначається наявністю дрібних денудаційних форм (уступи, насипи, тераси), що утворились як природним шляхом, так і під впливом тривалої господарської діяльності. Ґрунтова поверхня у межах двору частково вирівняна під час забудови (планування, мощення, спорудження комунікацій).

Основу геологічного розрізу складають лесові та лесовидні суглинки, потужністю 10–15 м, що залягають на водно-льодовикових пісках і супісках. Ґрунти — світло-бурі лісові (лесові), добре дреновані, із середнім вмістом гумусу (2–3 %).

У пониженнях та вздовж комунікацій спостерігаються техногенні насипні ґрунти (суміші суглинків, будівельних матеріалів, піску). Глибина залягання ґрунтових вод у межах резиденції — 10–15 м, при опадах або підпитті із верхніх водоносних горизонтів може зменшуватись до 5–7 м.

Територія належить до помірно-континентальної зони з м'якою зимою та теплим вологим літом. Основні кліматичні показники (за Чернівецькою метеостанцією):

- Середньорічна температура повітря — +8,3 °С;
- Середня температура січня — -3,5 °С, липня — +19,2 °С;
- Річна кількість опадів — $\approx$ 650–700 мм, максимум — у червні–липні;
- Кількість днів зі сніговим покривом — 45–60;
- Переважають вітри західного та північно-західного напрямків.

Такі умови сприяють активному розвитку ґрунтово-ерозійних процесів при порушенні поверхневого покриву, що є суттєвим для інженерно-геодезичних досліджень території.

Основний водний об'єкт регіону — річка Прут, яка протікає на відстані близько 2 км на південь від території університету. Безпосередньо в межах комплексу поверхневі водотоки відсутні; дренавання здійснюється системою поверхневого стоку через зливову каналізацію. Мікрорельєф спрямований у бік центральної частини міста, тому в зоні господарського двору формується локальна депресія, де можливе тимчасове накопичення дощових вод.

Більша частина території зайнята архітектурними спорудами, мощенням і декоративними газонами. Рослинність представлена:

- декоративними породами (ялина, туя, сосна, граб, каштан, липа),
- залишками старого паркового насадження (переважно липово-букові групи).

Північна та західна частини мають щільне озеленення, тоді як господарський двір — частково асфальтовану та ґрунтову поверхню, придатну для проведення тахеометричних вимірювань.

Територія резиденції — це урбанізований історико-архітектурний комплекс, внесений до Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО (2011 р.). Протягом понад 140 років тут сформувався комплексний техногенний ландшафт із домінуванням забудови, вимощених доріжок, штучного дренажу та декоративного озеленення.

Мікрорельєф зазнав багаторазового планування при будівництві корпусів, прокладанні комунікацій і благоустрої території, тому сучасна поверхня — поєднання природних форм і техногенних насипів.

Екологічні та інженерно-геодезичні особливості:

- Територія має стабільний геологічний стан, придатна для проектних та будівельних робіт.
- Основні геодезичні труднощі пов'язані з ущільненням забудови, тінню від будівель при GNSS-вимірюваннях, а також утворенням локальних замкнених понижень, що впливають на моделювання рельєфу.

- Абсолютні висоти території, визначені за результатами тахеометричних спостережень, варіюють у межах 241.40–241.85 м, що збігається з даними топопланів масштабів 1:500 та 1:2000.

Фізико-географічні умови території Резиденції ЧНУ визначаються:

- положенням на підвищеному плато правобережжя Пруту;
- лесовими ґрунтами з незначними перепадами висот (до 5–7 м);
- сприятливими кліматичними умовами для стабільного інженерного використання;
- урбанізованим типом сучасного ландшафту;
- високою точністю цифрових моделей рельєфу, побудованих на основі тахеометричних вимірювань.

Висновок до розділу 2. Територія резиденції митрополитів Буковини і Далмації — це урбанізована ділянка з вирівняним рельєфом лесового плато висотою близько 242 м, із незначними ухилами на південний схід і локальними пониженнями в межах господарського двору. Геоморфологічні та гідрологічні умови сприятливі для виконання геодезичних, будівельно-проектних і моніторингових робіт.

РОЗДІЛ III. ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ЦМР ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Створення цифрової моделі рельєфу по аркушах топоплану 1:2000 і 1:500.

В дослідженні як геооснова використано космічні знімки високої роздільної здатності – розміри пікселя 50 на 50 см (Рис.3.1). Зображення вдало імпортовано до ГІС QGIS для території центральної частини міста Чернівці.

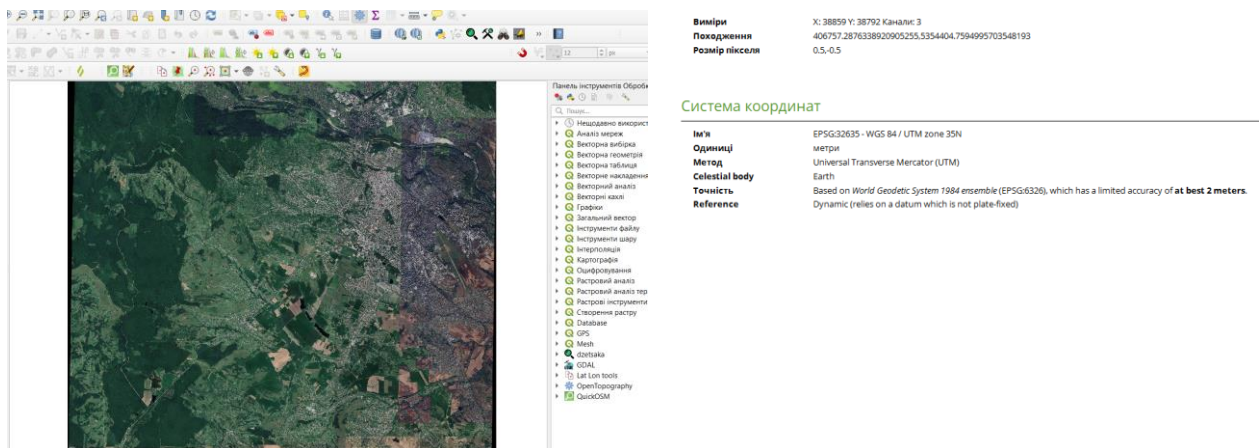


Рис.3.1 Імпортування космознімка до QGIS.

Для створення цифрової моделі рельєфу ми використали аркуші топографічних планів масштабом 1:2000 та 1:500 відповідної території. Проблемою імпортування таких растрових даних була не відома система координат (місцева). Тому вдалої геоприв'язки по можливих варіантах систем координат не відбулось, як і потенційних перепроєкціювань зображення. Через це здійснено геоприв'язку аркушів топопланів по характерним точкам космічного зображення високої роздільної здатності (Рис.3.2). Для підвищення точності прив'язки використано 12 точок по всій території аркуша. У налаштуваннях використано тип перетворення - Поліноміальний 1, як найбільш вдалий тип перетворення без значних спотворень, Цільова система координат зазначена була як і в прєкті, метод

інтерполяції використано Cubic — кубічна інтерполяція. Це найкращий метод, якщо наша ціль — отримати плавну, реалістичну цифрову модель рельєфу (ЦМР) з горизонталей або точок висот. Цей метод створює плавні переходи між значеннями висот (без «сходинок»), добре відновлює похили і вершини — ідеально для аналізу затоплення, схилів, експозиції, тощо. Алгоритм використовує кубічну згладжену поверхню на основі 16 сусідніх пікселів.

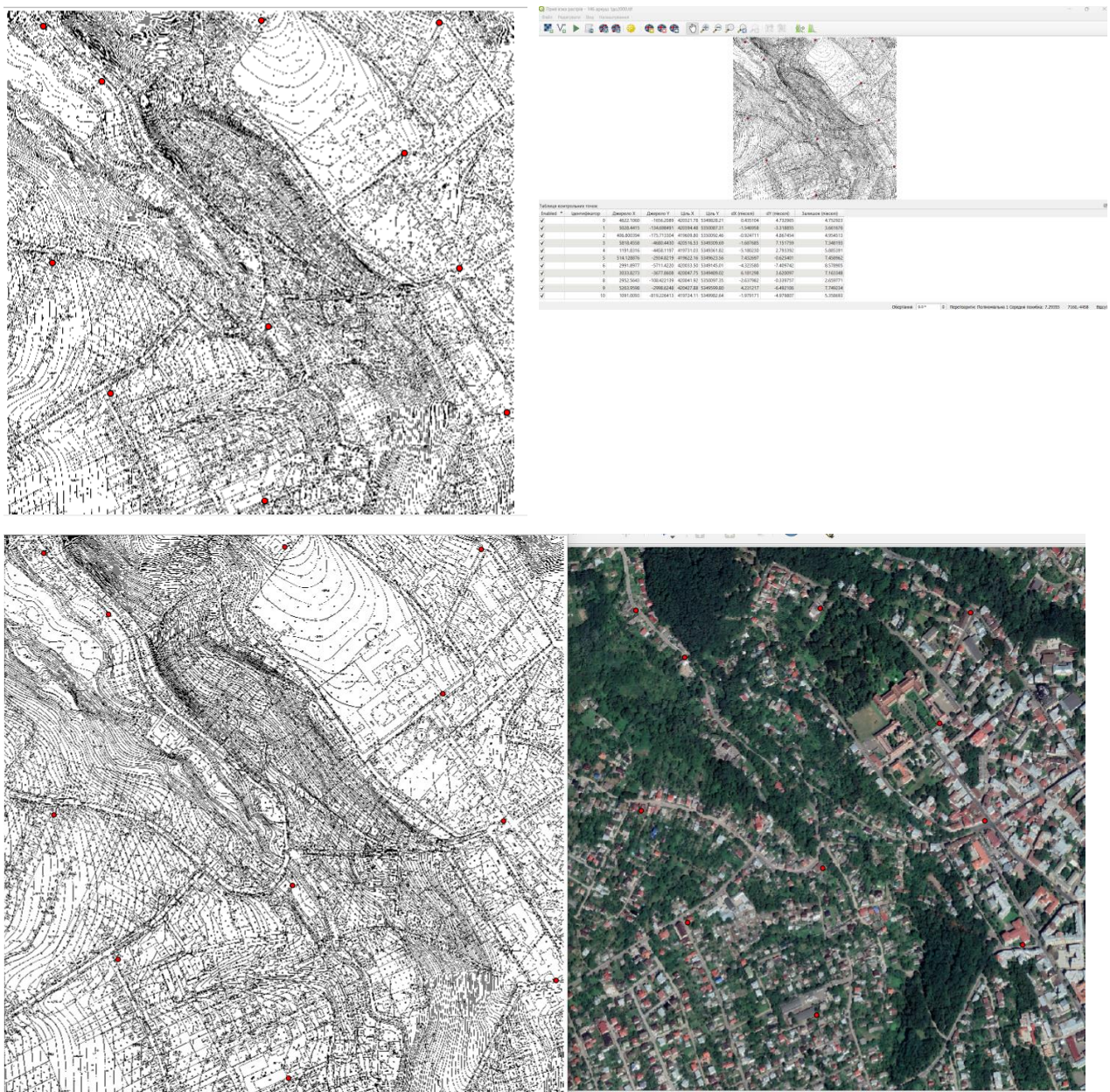


Рис.3.2 Геоприв'язка аркуша топоплану 1:2000 в QGIS.

Наступний етап був пов'язаний з векторизацією горизонталей. При використанні великомасштабних растрових зображень, як приклад у нашому випадку масштаб аркуша 1:2000, кількість деталізованих геооб'єктів в рази зростає, зокрема кількості горизонталей. Ручне дешифрування таких завдань досить трудомісткий процес, крім того об'єктивність ручного виділення кожної точки лінійного об'єкта також може мати похибки та помилки. Враховуючи вищезазначене використано плагін в даному програмному продукті Bunting Labs AI Vectorizer для QGIS. Плагін активує функцію “Vectorize with AI” — тобто автоматичну векторизацію растрових об'єктів за допомогою штучного інтелекту.

Плагін Bunting Labs AI Vectorizer (розробка британського стартапу Bunting Labs Ltd.) використовує неймережу, яка розпізнає лінії, контури, дороги, річки, межі тощо на растрових картах (сканах топопланів, ортофотопланах, схемах). Він перетворює растр у вектор (лінії, полігони, точки) майже так само, як це робиться вручну, але автоматично.

Увімкнувши редагування для створеного нового векторного шару (наприклад, gorizontali.shp) вмикаємо кнопку “Vectorize with AI” (Рис.3.3).

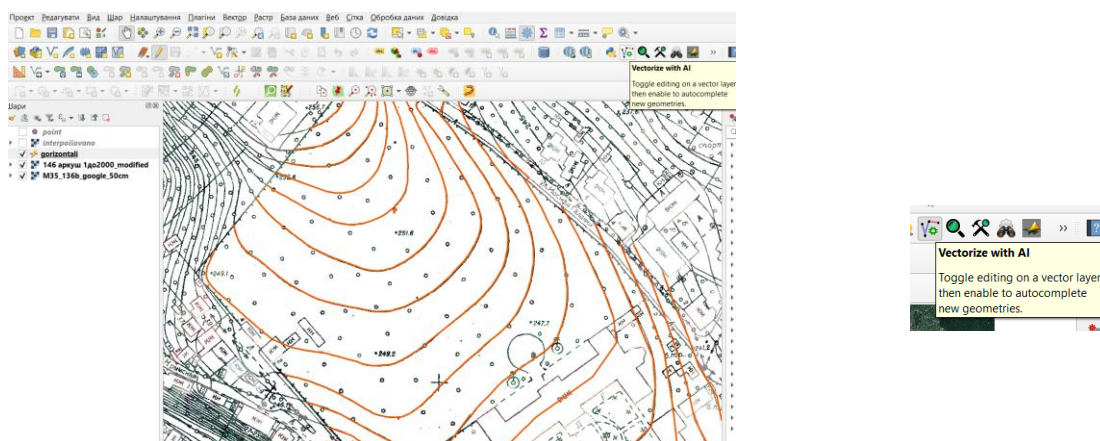


Рис.3.3 Використання плагіна Bunting Labs AI Vectorizer

Плагін надсилає видиму частину карти (растр) на сервер Bunting Labs. Штучний інтелект аналізує зображення (розпізнає кольори, товщини ліній, патерни) і повертає геометрії. У QGIS з'являються векторні лінії або

полігони, які можна редагувати. Плагін використовується для: автоматичної оцифровки горизонталей (контурних ліній); трасування доріг, річок, меж ділянок зі сканованих карт; створення масок і контурів з топопланів або схем; напівавтоматичної векторизації PDF-карт. Важливо, що плагін вимагає інтернет-з'єднання — AI обробка відбувається на сервері, також необхідна безкоштовна реєстрація (через <https://buntinglabs.com>); Можна працювати локально тільки після отримання доступу до academic/enterprise license. Цей плагін вдало підходить саме для нашої задачі — автоматичного виділення горизонталей із растрового топоплану.

Таким чином вдалось оцифрувати горизонталі для території досліджень. Далі варто підготувати векторні горизонталі. В таблиці атрибутів даного лінійного шару необхідно створити новий атрибут з висотами — зазвичай поле можна назвати ELEV, Z, висота або щось подібне. Це обов'язкова умова, бо QGIS буде інтерполювати висоти саме з цього поля.

Побудовано TIN (трикутну нерегулярну сітку) через Processing Toolbox. Відкривши Інструменти обробки - пошук: “TIN interpolation” (у меню: Обробка - Панель інструментів - Інтерполяція - TIN interpolation). У налаштуваннях потрібно вказати:

- Input layer: виберіть ваш шар gorizontali;
- Interpolation attribute: поле з висотою (ELEV або висота);
- Type: Linear;
- Extent: натисніть кнопку “...” - From layer - виберіть ортофото або топоплан (щоб охопити потрібну зону);
- Output raster size: встановіть, наприклад, 1 x 1 м для високої точності;
- Output file: вкажіть шлях, де зберегти .tif.

Натиснувши Run — отримаємо TIN-інтерпольовану DEM (ЦМР) (Рис.3.4).

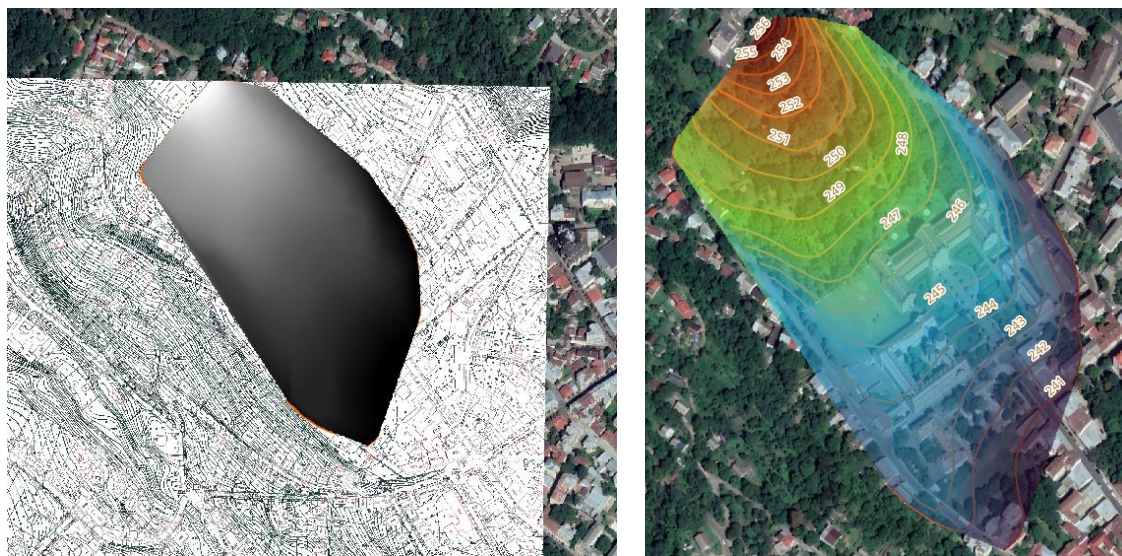


Рис.3.4 TIN-інтерпольована DEM

Здійснено перевірку та корекцію ЦМР. Відобразивши створену DEM із кольоровою шкалою (“Singleband pseudocolor”) — перевірено, чи логічно змінюються висоти. Якщо видно “сходи́нки” або провали — варто використати фільтр: Растр - Аналіз - Сгладжування (Gaussian filter) або `r.neighbors` у GRASS для згладження.

Для підвищення точності створення ЦМР варто дешифрувати окремі висотні позначки як точкові об’єкти і вказати їх абсолютні висоти з аркуша топоплану, що й було зроблено (Рис.3.5).

Варто підготувати шари, обидва шари повинні мати однакову систему координат (наприклад, UTM WGS84 zone 35N або УСК-2000 зона 7). Якщо не впевнені — клацніть правою кнопкою - “Властивості - Джерело - EPSG”.

Відбулось створення єдиної ЦМР із точок і горизонталей через інструмент TIN interpolation, що дає найякісніший результат. Відкривши меню: Обробка - Панель інструментів - Interpolation - TIN interpolation у полі Input layers потрібно додати обидва шари: `vidmitky` — тип: `points`, `gorizontali` — тип: `lines` і у кожному вказати поле з висотою (`elev` або `висота`), у полі Interpolation method – Linear, а в полі Extent - “From layer” - обрати, наприклад, ортофотоплан чи межі проєкту. У полі Output raster size (pixels):

вказати 1×1 м (для території до 1 км^2) або 2–5 м, якщо ділянка більша. Після обрання шляху для збереження натиснути Run, що дозволить отримати растрову ЦМР (DEM).

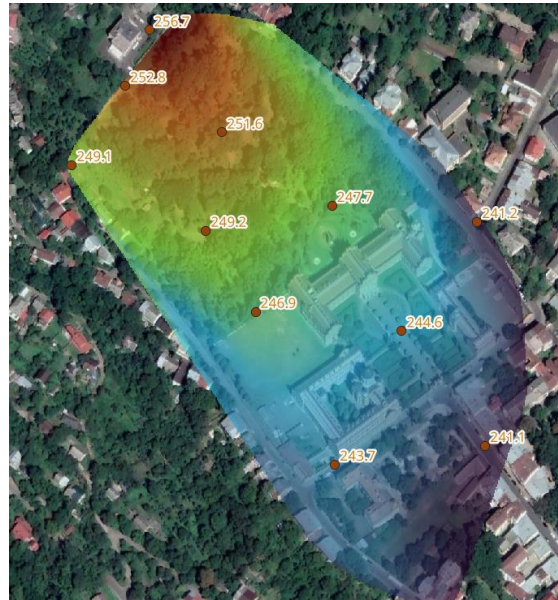
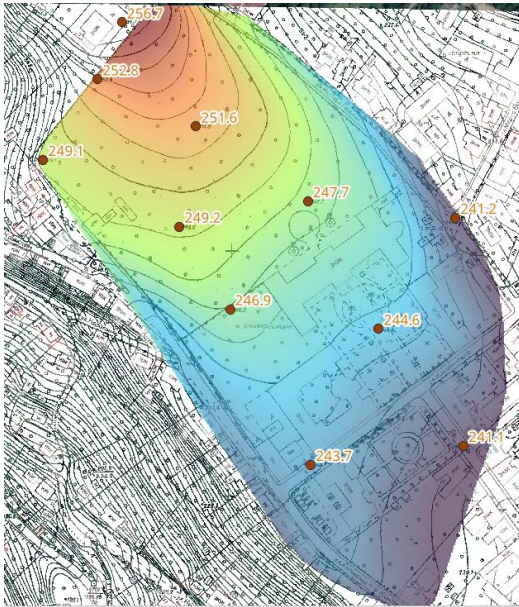


Рис.3.5 Векторизовані точки по топоплану з абсолютними висотами.

Проведено перевірку результату, що отримали: змінено стиль шару DEM на Singleband pseudocolor і використано одну із запропонованих палітрів для наочності, здійснено зміну прозорості шару. Візуально перевірено, що лінії відповідають формі горизонталей.

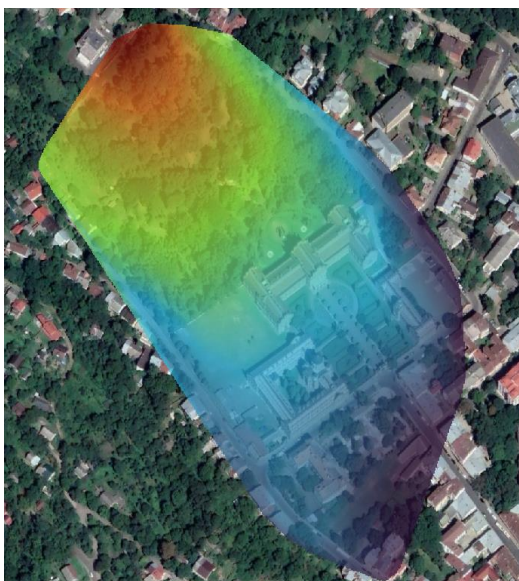


Рис. Створена ЦМР враховуючи оцифровані горизонталі та висоти по топоплану 1:2000 для території резиденції ЧНУ імені Юрія Федьковича.

В роботі створено ЦМР для території досліджень використовуючи аркуш топографічного плану масштабу 1:500. Аналогічно як і в попередньому випадку вдалось здійснити геоприв'язку аркуша по характерним геооб'єктам місцевості космічного знімка високої роздільної здатності. Після геоприв'язки дешифровано горизонталі та оцифровано їх. Крім того створено та оцифровано окремі висотні точки та репери, що віднайдені на топоплані. Так, вдалось дешифрувати 51 горизонталь, 29 реперів і 365 точок з абсолютною висотою території (Рис.3.6).



Рис.3.6 Дешифровані горизонталі, точки та репери з абсолютними висотами по топоплану 1:500.

Побудовано TIN (трикутну нерегулярну сітку) через Processing Toolbox. Здійснено перевірку та корекцію ЦМР. Відобразивши створену DEM із кольоровою шкалою (“Singleband pseudocolor”) — перевірено, чи логічно змінюються висоти (Рис.3.7).

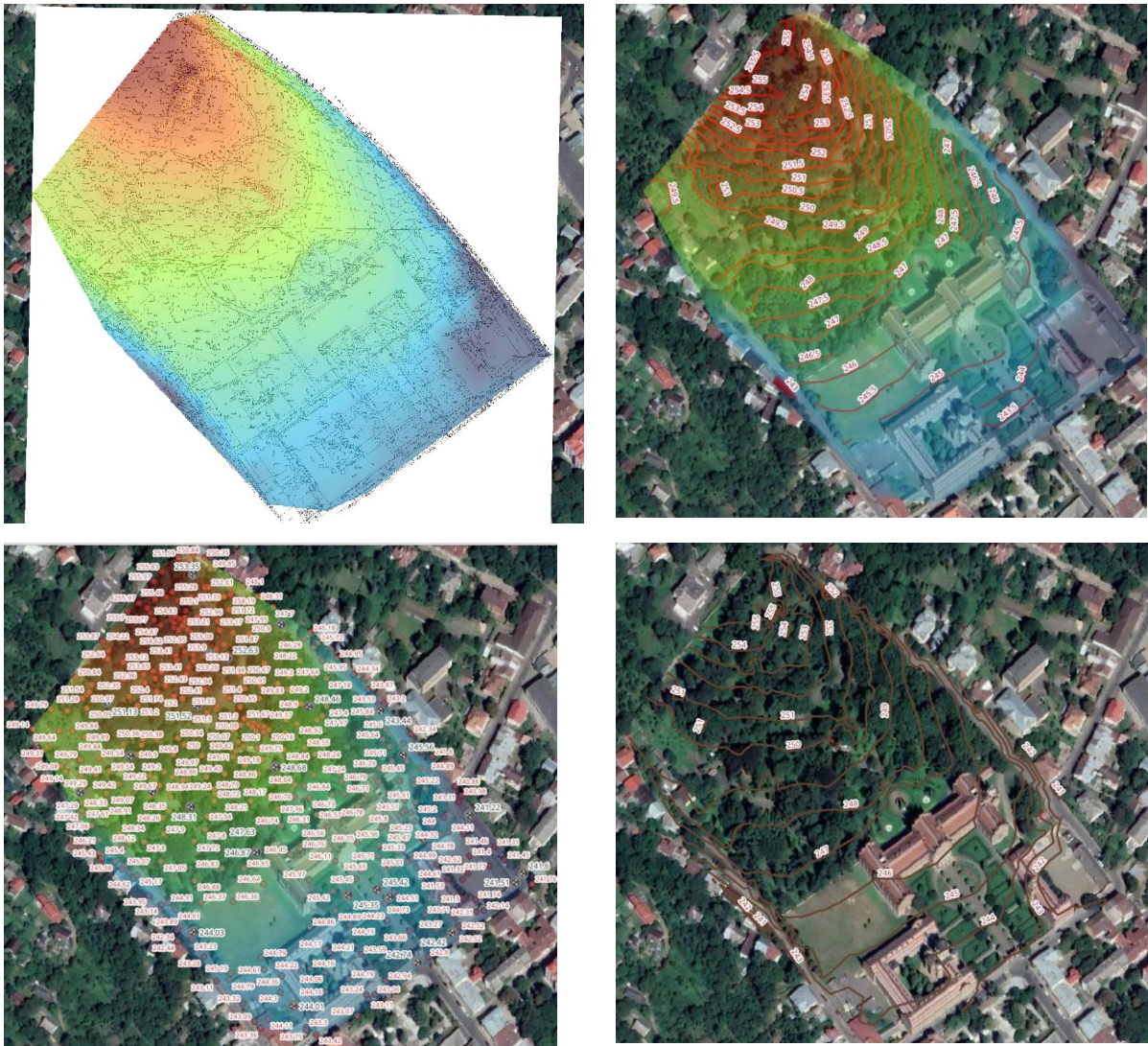


Рис.3.7 Створена ЦМР враховуючи оцифровані горизонталі та висоти по топоплану 1:500 для території резиденції ЧНУ імені Юрія Федьковича.

3.2 Порівняння цифрових моделей рельєфу.

В роботі було поставлено окремі завдання порівняти різні ЦМР (побудувати карту різниць висот), розрахувати статистику (мін/макс, середнє, СКП), виявити зони систематичних відхилень, оцінити точність (accuracy / RMSEz);

Для об'єктивної оцінки варто вирівнювання параметри моделей. Обидва растра мають бути представлені у одній проєкції (наприклад, EPSG:32635 -

WGS 84 / UTM zone 35N); з однаковим розміром пікселя (наприклад, 1×1 м); з однаковим охопленням (extent).

Створивши цифрові моделі рельєфу по аркушах топоплану 1:2000 і 1:500 візуально спостерігається, що територія, що покривається ними є трішки різною. Так як аркуш 1:2000 дозволив дешифрувати лінії горизонталей на більшу територію, то для об'єктивного порівняння двох ЦМР доречно було б виокремити спільні межі. Тому створено окремий полігональний шар, що вміщує покриті ділянки двома ЦМР. Після чого вдалось вирізати по черзі кожен з моделей рельєфу по заданим спільним межам (Рис.3.8).

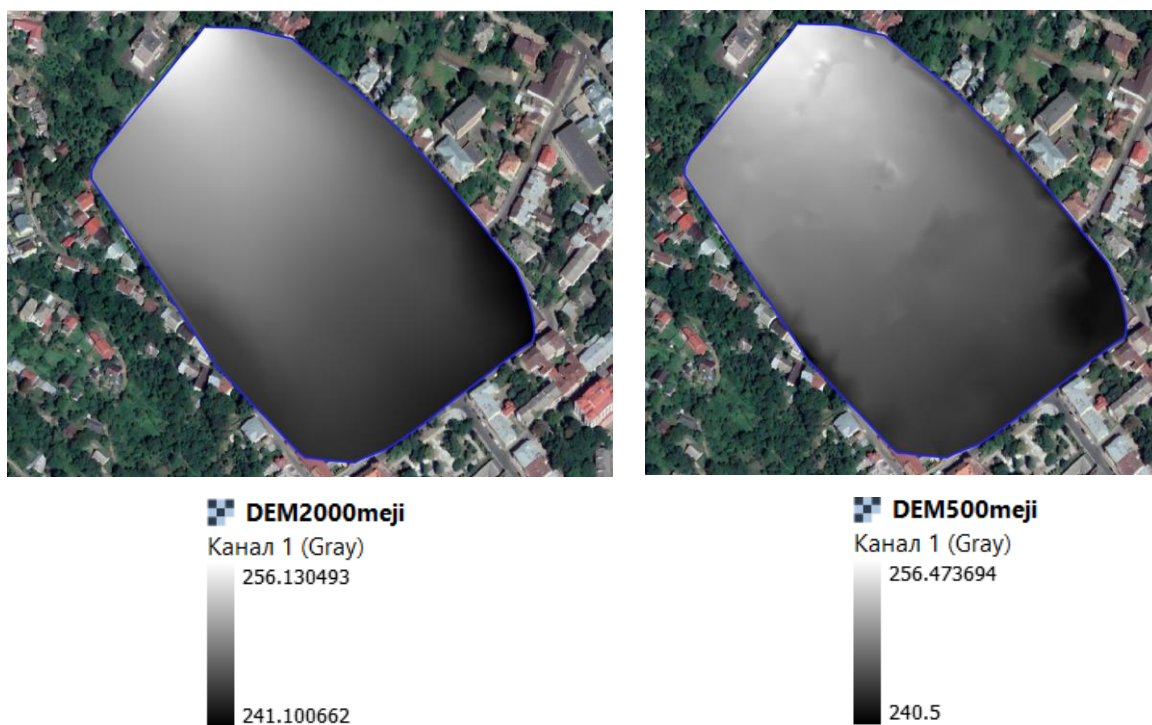


Рис.3.8 Дві ЦМР створені по аркушу топоплану 1:2000 та 1:500

Уже навіть візуальну та через атрибутику у налаштуваннях шару видно різницю по двом ЦМР. В першу чергу це зумовлено різними максимальними та мінімальними абсолютними висотами. Зокрема по ЦМР 1 (масштаб 1:2000) максимальні значення по абсолютній висоті менші – 256,13 м в порівнянні з ЦМР 2 (масштаб 1:500) – 256,47 м. Натомість найменші

показники по абсолютній висоті вищі у першому випадку – 241,1 м проти 240.5 у другому.

Побудовано карти різниць висот між двома ЦМР. Для цього в меню Растр обрано Калькулятор растрів де введено формулу:

$$\text{"DEM_2000@1" - "DEM_500@1"} \quad (1)$$

В результаті отримано чорно-біле зображення: DEM_diff.tif Це дасть різницю висот у кожному пікселі (позитивне — де DEM_2000 вище, негативне — де нижче).

Для підвищення візуального сприйняття різниці двох ЦМР та аналізу різниць по висотах проведено певні налаштування рендерингу. Для DEM_diff.tif встановлено стиль Singleband pseudocolor, рівні інтервали з трьома класами. Середину (0) виставлено як нейтральний колір (білий), усі позитивні значення вказано кольором червоним (перевищення DEM_2000 над DEM_500), а негативні показники – синім кольором (зниження відповідних ЦМР між собою). Це наочно показує, де моделі не збігаються (Рис.3.9).

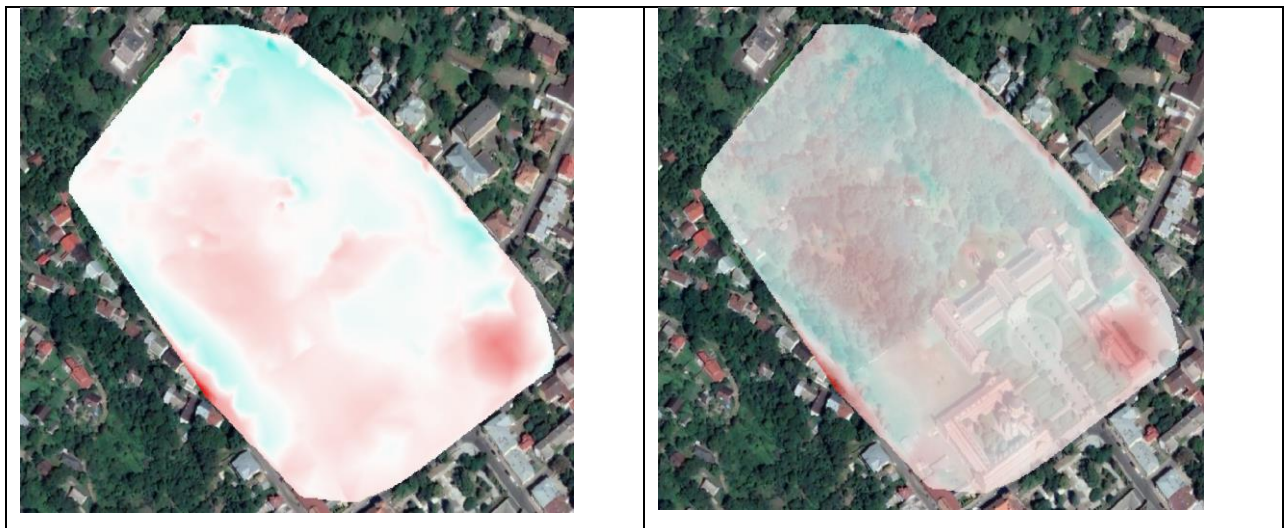


Рис.3.9 Різниця абсолютних висот між двома ЦМР

Досліджено статистичний аналіз різниць між двома ЦМР. Клацнувши правою кнопкою на DEM_diff - Властивості - Інформація можна побачити статистичну характеристику (Рис.3.10).

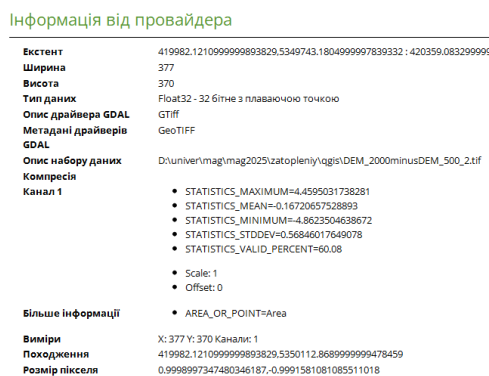


Рис.3.10 Статистична характеристика по двом ЦМР в QGIS

Ми отримали:

- MIN – мінімальна різниця (м);
- MAX – максимальна різниця (м);
- MEAN – середнє відхилення;
- STDDEV – стандартне відхилення ($\approx$ СКП).

$$\text{СКП} (\sigma) = \text{STDDEV}$$

$$\text{RMSE (Root Mean Square Error)} = \sqrt{(\sum(\Delta h^2)/n)}$$

Розберемо статистичну характеристику по-геодезичному, щоб зрозуміти якість і точність моделей (Табл.3.1).

Таблиця 3.1

Статистична характеристика по двом ЦМР

Параметр	Значення	Пояснення
STATISTICS_MAXIMUM	+4.4595 м	Найбільше перевищення DEM_2000 над DEM_500
STATISTICS_MINIMUM	-4.8623 м	Найбільше заниження DEM_2000 порівняно з DEM_500
STATISTICS_MEAN	-0.1671 м	Середнє відхилення (систематична похибка)
STATISTICS_STDDEV	0.5686 м	Стандартне відхилення, тобто СКП (середньоквадратична похибка)
STATISTICS_VALID_PERCENT	$\approx 60 \%$	Частка валідних пікселів (область перекриття DEMів)

Аналіз середнього відхилення $\text{Mean} = -0.167$ м. Це означає, що модель DEM 2000 в середньому на 17 см нижча за модель DEM 1:500. Це дуже мале систематичне зміщення, і воно не перевищує допустимі норми для топопланів масштабів 1:2000–1:500 (для таких масштабів допустима розбіжність по висоті $\leq 0.3\text{--}0.5$ м). Отже, систематичної похибки практично немає.

Аналіз стандартного відхилення (СКП) $\text{STDDEV} = 0.5686$ м. Це фактично СКП (σ), тобто середньоквадратична похибка різниць. Вона показує, наскільки у середньому коливаються різниці відносно середнього (-0.17 м). Отже, $\sigma = 0.57$ м — у межах допустимої похибки для цифрової моделі рельєфу, отриманої з топоплану 1:2000. Це відповідає класу точності, прийнятному для створення топографічної основи М 1:2000 (Табл.3.2).

Табл.3.2

Нормативні вимоги для оцінки точності моделі

σ (м)	Оцінка точності	Якість моделі
≤ 0.30	дуже добра	висока точність (1:500)
$0.30 - 0.60$	добра	прийнятна для 1:2000
> 1.00	слабка	потребує перевірки джерел

Екстремальні відхилення:

- Максимальне відхилення $+4.46$ м
- Мінімальне -4.86 м

Такі різкі аномалії, швидше за все, локальні артефакти — через різницю в межах моделей (наприклад, обрізані краї, різні межі TIN, зони без точок чи водні об'єкти). Їх не слід включати до статистичної оцінки точності, якщо вони розташовані на периферії як у нашому випадку.

Порівняння цифрових моделей рельєфу, побудованих за топографічними планами масштабів 1:2000 та 1:500, показало, що середнє відхилення становить -0.17 м, а середньоквадратична похибка (СКП) —

0.57 м. Систематичне заниження моделі 1:2000 не перевищує 20 см, що знаходиться в межах допустимої похибки. Таким чином, ЦМР за топопланом 1:2000 може бути використана для інженерно-геодезичних цілей масштабу 1:2000–1:500 без додаткової корекції.

3.3 Використання електронного тахеометра Sokkia CX-55 для уточнення геодезичних даних при побудові ЦМР.

Так як створення ЦМР вдалось зробити за аркушами топопланів різних масштабів було встановлено, що за рахунок відсутності інформації на окремих ділянках території досліджень, щодо абсолютних висот, зокрема горизонталей та висотних точок, створення ЦМР є проблематичним і менш точним ніж в місцях з наявною інформацією. Такими проблемними ділянками, як підтвердила кінцева ЦМР (різниця по двом ЦМР масштабу 1:500 і 1:2000) є крайні межі топопланів та частина господарського двору ЧНУ імені Юрія Федьковича (Рис.3.11).



Рис.3.11 Ділянки з максимальним неспівпадінням ЦМР по аркушах топоплану масштабу 1:500 і 1:2000

В першу чергу важливим є додатково встановити та визначити по окремих точках абсолютну висоту для території саме господарського двору ЧНУ імені Ю.Федьковича враховуючи заплановані проєктні будівельні роботи на цій ділянці.

Через це використовуючи матеріально-технічну базу кафедри геодезії, картографії та управління територіями географічного факультету ЧНУ імені Юрія Федьковича, а саме електронний тахеометр CX 55 Sokkia5 (Рис.3.12) здійснено вимірювання координат точок і абсолютних висот на території господарського двору ЧНУ імені Ю.Федьковича.

Кутова точність приладу становить $\pm 5''$, похибка по відстані $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm} \cdot D)$. Це дає змогу розрахувати очікувану точність координат і висот (СКП_x, СКП_y, СКП_h).



Рис.3.12 Електронний тахеометр CX 55 Sokkia5

В попередні роки для території визначено за допомогою GNSS приймача координати окремих точок місцевості. Окремі точки з відомими геодезичними даними використано як базисну лінію.

Спочатку відбулось установка інструменту на точці базисної лінії: встановлено штатив і закріплено тахеометр над відомою реперною точкою. Вирівняно інструмент за круговим та оптичним рівнем. Далі встановлено нуль відліку (0°) через прив'язку до відомої точки базисної лінії. Для цього проведено прив'язку до вихідної точки з відомими координатами та висотами (X_0, Y_0, H_0), введено її в пам'ять приладу як «станцію». Виміряно горизонтальне та вертикальне положення (горизонтальний кут, вертикальний кут) та відстань до референтної точки. Прилад обчислив автоматично свою координату і висоту H_0 . Ця операція — геодезична перевірка станції (Рис.3.13).



Рис.3.13 Розташування базису та точок для визначення їх координат і висот

Знімання нової точки відбувалось наступним чином: наведено прилад на призму, прилад вимірює горизонтальний кут, вертикальний кут, відстань. Потім автоматично обчислює координати (X, Y) і висоту (типово $H = H_0 + \Delta H$, де $\Delta H = -D \cdot \sin(\text{верт.кут}) \pm \text{відстань по вертикалі}$). Обов'язково

відбувається запис і збереження даних в пам'яті тахеометра з номером, описом, координатами та висотою.

Визначення абсолютної висоти. Якщо на станції відома абсолютна висота (H_0), то нова точка отримає висоту $H = H_0 \pm \Delta H$. Якщо станція «не прив'язана» щодо висоти, можна використати метод нівелювання або підключити прилад до мережі реперів з відомими висотами. Рекомендується робити перевірку висоти на контрольних точках (репери) та фіксувати похибку.

Абсолютна висота обчислювалась за формулою:

$$H = H_0 + h_i - D \cdot \sin(v) - h_t, \quad (3)$$

де h_i — висота приладу, h_t — висота призми. Контрольне спостереження з іншої станції підтвердило стабільність результатів (розбіжність ≤ 0.03 м). Середня похибка висотних визначень (RMSE_z) склала 0.05 м, що повністю задовольняє вимоги до точності тахеометричного знімання для масштабів 1:500–1:2000.

Далі дані передано через USB до програми SokkiaLink/QGIS для обробки координат і контролю СКП.

Важливим було провести контроль і перевірку вимірювань. Перевірка умов: рівне положення триподу, компенсатор у межах допустимого, чистота відбивача або мішені; знімання контрольної точки (репера) після серії вимірювань для оцінки зміщення чи похибки; запис точок повторно (багаторазове вимірювання) для статистичної оцінки точності. Так як відстань між приладом і точками спостережень є відносно невеликою, то здійснено для контролю спостереження визначення координат і висот точок з іншої базисної точки. Дані, що отримані практично співпали.

Таким чином вдалось отримати і перевірити додатково абсолютні висоти окремих 8 точок ділянки господарського двору ЧНУ імені Юрія Федьковича.

3.4 Створення ЦМР за даними топопланів та тахеометричного знімання території досліджень.

Отже, виконано локальне ущільнення висотної основи — тобто доповнено DEM фактичними висотними даними, що повністю виправдано з наукової та практичної точки зору (особливо перед будівельними роботами).

Дані, що отримали : горизонталі з висотами, окремі підписані відмітки висоти, дві DEM (ЦМР) з різних масштабів (1:500 і 1:2000), тахеометричні висоти.

Далі задача полягала з двох частин: створити єдину уточнену ЦМР (яку можна вважати «еталонною» для ділянки) і визначити її точність (RMSE, СКП).

ЦМР на основі топопланів 1:2000 і 1:500 узгоджуються добре. Середня різниця: -0.17 м. СКП: 0.57 м. Похибки в межах норми для інженерно-геодезичних робіт. Рекомендовано уточнення на краях полігона та для окремих ділянок, де різниця в метрах суттєва.

Побудова остаточної ЦМР відбувалась розпочавши зібрання всіх висотних вхідних даних в один набір. Потрібен один шар, який міститиме:

- лінії горизонталей з атрибутом висоти (поле H або ELEV),
- окремі висотні точки з атрибутом висоти,
- тахеометричні точки з атрибутом висоти H_tach.

Потрібно переконатись, що: у шарі горизонталей є поле з висотою (наприклад elev), у шарі висотних точок є поле з висотою (наприклад elev), у тахеометричних точок теж є поле з висотою (наприклад H_tach - перейменуйте через Field Calculator у elev, щоб усюди було однаково). Це важливо зробити, так як інтерполяція буде брати значення з конкретного поля. Необхідно привести усі шари в одну систему координат. Результат, що отримаємо - єдиний набір висотних обмежень місцевості:

- густі дані там, де був план 1:500,
- розріджені там, де тільки план 1:2000,

- і найцінніше — тахеометричні точки, особливо в проблемній зоні господарського двору.

Завдяки тахеометру «підтягнуто» провисання ЦМР у місцях, де топоплани були бідні або суперузагальнені.

Побудову самої ЦМР здійснено через створення TIN з урахуванням різних типів джерел

Це зроблено через інструмент TIN interpolation у QGIS.

Відкрили Обробка - Інструменти інтерполяції - TIN interpolation. У полі Input layers додали шар із тахеометричними точками (тип geometry = points), поле висоти = elev; шар із звичайними висотними точками з планів (points), поле = elev; шар із горизонталями (lines), поле = elev. Тип інтерполяції: Linear TIN (лінійна). Це важливо, бо вона зберігає «злам» рельєфу (бордюри, укоси, стіни). Вибрано екстент (Extent) і розміру пікселя (Pixel size) 0.5 м або 1 м (на території господарського двору це нормально) для дуже дрібних перепадів, типу поребриків і лотків, можете дати 0.2 м, але файл буде важкий. Натискаємо Run - отримуємо оновлену DEM_final.tif Це і є найточніша ЦМР (Рис.3.14) ніж просто DEM 1:500, тому що вона:

- коливається по формах горизонталей,
- включає щільні висоти дрібних деталей із тахеометра,
- заповнює дірки 1:2000 там, де немає даних 1:500,
- не дає штучних провалів на краях (бо обрізано екстентом).

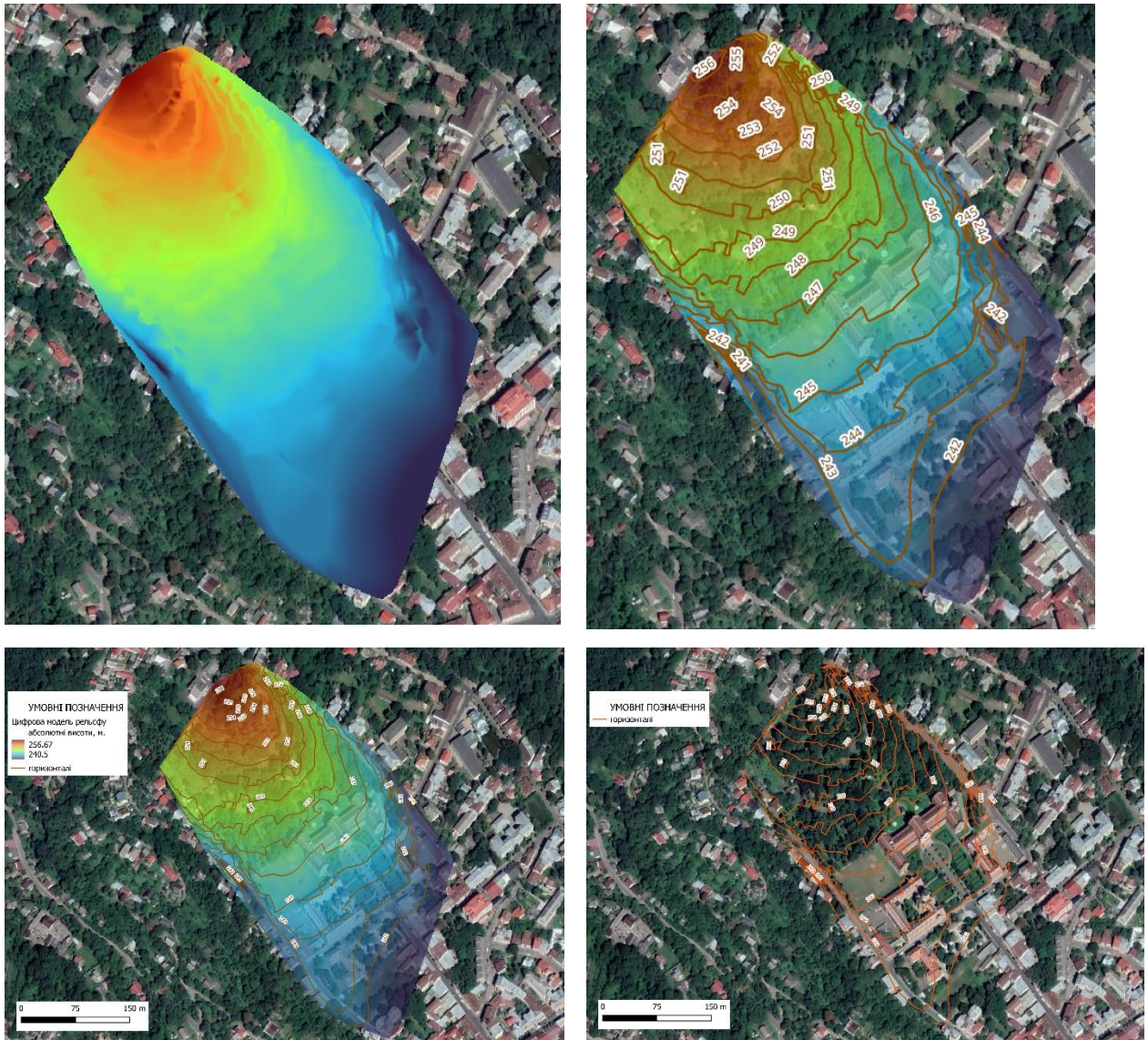


Рис.3.14 Створена ЦМР по даним топопланів 1:500, 1:2000, тахеометричного знімання для території Резиденції ЧНУ імені Юрія Федьковича.

Проведено перевірку точності остаточної ЦМР. Підготовлено контрольні точки: контроль = тахеометричні точки (бо це найточніші “натурні” дані). Використано інструмент Sample Raster Values (Обробка даних-Растровий аналіз-Шаблон растрових значень). В полі Input point layer вказано контрольні точки (з відомими H_{true}), в полі Raster layer(s) - кінцева DEM_final_clip.tif. Результат дозволив нам отримати у атрибутах кожної точки два поля:

- H_true (заміри тахеометром),
- H_dem (висота з DEM_final_clip).

Здійснено розрахунок похибок по кожній точці. Відкривши таблицю атрибутів нового шару - Field Calculator - створено нове поле dH (Decimal):

"H_dem" - "H_true"

Отримали різницю по висоті для кожної контрольної точки. Це класична «похибка моделі по пункту».

	id	Z	SAMPLE_1	dh
1	NULL	241.540	241.63404	0.094
2	NULL	241.410	241.42098	0.011
3	NULL	241.800	241.85296	0.053
4	NULL	241.790	241.79286	0.003
5	NULL	241.770	241.74662	-0.023
6	NULL	241.760	241.7694	0.009
7	NULL	241.740	241.74467	0.005

Рис. 3.15 Атрибутивна таблиця різниці замірів тахеометра з висотами з DEM_final_clip.

Визначено статистику по dH. У тій же таблиці атрибутів натиснуто на кнопку "Статистика поля" (іконка з гистограмою), якщо не з'явиться то можна через інструмент статистика  в меню візуального вибору інструментів, обрано поле dH і автоматично представлено розрахунки (Табл.3.4).

Таблиця 3.4

Статистичні дані різниці замірів тахеометра з висотами з DEM_final_clip.

Показник	Значення	Пояснення
Кількість (Count)	7	7 контрольних точок

Показник	Значення	Пояснення
Середнє (Mean)	0.0217 м	середнє відхилення між DEM та тахеометричними висотами
St dev (pop)	0.0361 м	стандартне відхилення (СКП для всієї сукупності)
St dev (sample)	0.0389 м	стандартне відхилення (СКП для вибірки — правильніше саме це брати)
Мінімум (Min)	-0.023 м	найменше (негативне) відхилення
Максимум (Max)	+0.094 м	найбільше позитивне відхилення
Діапазон (Range)	0.117 м	розмах похибок (0.117 м)

Середнє відхилення Mean = +0.0217 м, це означає, що цифрова модель трохи завищує висоту в середньому на 2.2 см порівняно з фактичними тахеометричними вимірами. Це практично нульове систематичне зміщення, бо в геодезичних розрахунках допустиме ± 5 см навіть для планів 1:500.

СКП (St.dev = 0.036–0.039 м) це є середньоквадратична похибка (СКП) визначення висот за моделлю. СКП = 3.6–3.9 см — це дуже висока точність для локальної ЦМР. Для порівняння (Табл.3.5):

Таблиця 3.5

Допустимі СКП згідно масштабу

Масштаб плану	Допустима СКП по висоті
1:500	± 0.05 м
1:1000	± 0.10 м
1:2000	± 0.20 м

Отже, ЦМР цілком відповідає навіть вимогам 1:500 масштабу.

Межі похибок ($-0.023 \dots +0.094$ м) з розмахом лише - 12 см. Максимальне відхилення (0.094 м) можна вважати локальним викидом, найімовірніше — різкий укос або похибка інтерполяції в місці без щільних вихідних точок.

Підсумкова оцінка точності наступна (Табл.3.6)

Таблиця 3.6

Підсумкова оцінка точності ЦМР

Параметр	Позначення	Значення	Інтерпретація
Середня різниця	$\Delta \bar{h}$	+0.0217 м	систематичне зміщення практично відсутнє
СКП (std dev sample)	σ	0.039 м	висока точність ЦМР
$RMSE_z \approx \sqrt{(\sigma^2 + \Delta \bar{h}^2)}$	≈ 0.044 м	повна середньоквадратична похибка висот	
Діапазон відхилень		–0.023 ... +0.094 м	дуже вузький

$RMSE_z \approx 0.04\text{--}0.05$ м (4–5 см) — результат відмінний, повністю відповідає класу точності топографічного знімання 1:500.

За результатами порівняння висот тахеометричних точок із висотами, отриманими з уточненої цифрової моделі рельєфу (ЦМР), середнє відхилення становить +0.022 м, середньоквадратична похибка (СКП) — 0.039 м, повна $RMSE_z$ — 0.044 м. Таким чином, ЦМР характеризується високою точністю, що повністю відповідає вимогам топографічних зніманих масштабу 1:500 і може використовуватись для проектних робіт на території господарського двору ЧНУ імені Ю. Федьковича.

Висновки до розділу 3. На основі вихідних топографічних матеріалів масштабів 1:500 та 1:2000, даних тахеометричної зйомки Sokkia CX-55 та GNSS-визначених опорних точок виконано побудову уточненої ЦМР методом TIN-інтерполяції з урахуванням горизонталей і висотних точок.

Для уникнення похибок, крайові ділянки з недостатньою висотною інформацією були обрізані по межі досліджуваної території.

Точність моделі оцінена за незалежними контрольними точками, виміряними електронним тахеометром, шляхом вибірки значень ЦМР у цих точках (інструмент Sample Raster Values у QGIS).

За отриманими різницями висот обчислено середнє відхилення, середньоквадратичну похибку (СКП) та RMSEz.

ВИСНОВКИ

1. У роботі виконано побудову цифрових моделей рельєфу території Резиденції ЧНУ імені Юрія Федьковича на основі топографічних планів масштабів 1:2000 і 1:500, а також даних тахеометричного знімання і GNSS-визначених опорних точок.

2. Показано, що окремі ділянки (краї аркушів та господарський двір) мають недостатню кількість вихідних висотних даних, що призводить до локальних спотворень ЦМР і підвищення похибки. Порівняльний аналіз двох первинних ЦМР (DEM_2000 і DEM_500) дав середнє відхилення близько -0.17 м і СКП ~ 0.57 м, що відповідає допустимим нормам для топографічних планів масштабів 1:2000–1:500 і підтверджує методичну узгодженість джерел.

3. Додаткове тахеометричне знімання електронним тахеометром Sokkia CX-55 у проблемній зоні дозволило отримати уточнені абсолютні висоти окремих точок, сформувати локальну висотну опору й надати незалежні контрольні точки для валідації моделі.

4. На основі інтеграції горизонталей, точкових висот, реперів і тахеометричних вимірювань створено інтегровану ЦМР методом TIN-інтерполяції в середовищі QGIS. Точність фінальної ЦМР перевірена за незалежними контрольними точками: середнє відхилення становить $\sim +0.022$ м, стандартне відхилення (СКП) — ~ 0.039 м, а RMSEz — ~ 0.044 м. Це відповідає нормативним вимогам до знімань масштабу 1:500 і демонструє метричну придатність моделі для інженерно-будівельних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Децентралізація та ефективне місцеве самоврядування : [навчальний посібник для посадовців органів влади та фахівців з розвитку місцевого самоврядування]. К. : ПРООН/МПВСР, 2016. 269 с.
3. Деякі питання реалізації частини першої статті 12 Закону України “Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність” [Кабінет Міністрів України; пост. від 07.08.2013 р. № 646 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/646-2013>.
4. Закон України “Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність” від 23.12.1998 р. № 353-XIV [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/353-14>
5. Карпінський Ю. Лященко. К. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні: НДІГК, 2006. 107 с.
6. Карпінський Ю.О., Лященко А. А. Нові підходи до стандартизації та технічного регулювання в сфері географічної інформації. Львів. : Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Збірник наукових праць Західного Геодезичного Товариства. Ліга-Прес 2004. с. 283-291.
7. Козаченко Т. І., Курач Т. М. Геоінформаційне картографування науки та інноваційної діяльності в Україні Вісн. геодезії та картографії. 2004. №3. С. 32-43.
8. Колишко Р.А. Децентралізація публічної влади: історія та сучасні тенденції розвитку. Вісник КНУ. Серія «Міжн. відн.». 2015. Вип. 27. С. 198.
9. Линьов К.О. Децентралізація та лінійність у державному управлінні : автореф. дис. канд. наук з держ. упр. К., 2015. 210 с.
10. Мінченко Р.М. Проблеми децентралізації державної влади і їх взаємодія з

місцевим самоврядуванням в Україні. Держава і право. № 39. с.452

11. Мосов С.П., Тарасов В.М., Чорнокнижний О.А., Куковський С.А., Брезіцький Е.Ю. Географічні інформаційні системи: Підручник. К.: НАОУ, 2005. 240 с

12. Основні положення створення та оновлення топографічних планів масштабів 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500. – К. : Головне управління геодезії, картографії та кадастру при КМУ, 1998. – 56 с.

13. Основні положення створення Державної геодезичної мережі України: постанова Кабінету Міністрів України № 844 від 8 червня 1998 р. Збір. законодавства України. Сер. 1. Постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України. 1998. №9. С. 416.

14. Про затвердження Порядку обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі [Мінагрополітики України; наказ від 03.11.2014 р. № 435 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14>

15. Про Порядок охорони геодезичних пунктів. Кабінет Міністрів України; Постанова від 19.07.1999 № 1284.

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

17. Скрипник Я.П. Основи геоінформаційних технологій. Методичні вказівки та завдання до практичних і лабораторних робіт Чернівці: Рута, 2004. 44с.

18. Скрипник Я.П. Практикум з основ ГІС та геоінформаційного картографування: Навчально-мет.посібник. Чернівці: ЧНУ, 2014. 171 с.

19. Статистичний щорічник Чернівецької області за 2016 рік. Головне управління статистики у Чернівецькій області; за ред. А. В. Ротаря. Чернівці, 2017. 534 с.

20. Третяк А.М. Землевпорядне проектування: Теоретичні основи і територіальний землеустрій: Навч. Посібник. К.: Вища освіта, 2006. 528 с.