

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

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

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ГЕОПРИВ'ЯЗКИ РАСТРОВИХ
ТОПОГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ ГІС НА
ОСНОВІ ТАХЕОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ (НА ПРИКЛАДІ
ТЕРИТОРІЇ РЕЗИДЕНЦІЇ МИТРОПОЛИТІВ БУКОВИНИ ТА
ДАЛМАЦІЇ)**

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

Виконав:

студент 2 курсу, 208-М групи
спеціальності 193 "Геодезія та землеустрій"
ОПП "Геодезія"

Владислав КВАСНЕЦЬКИЙ

Керівники :

д.геогр.н., проф. кафедри геодезії,
картографії та управління територіями
Костащук І.І.

асист. кафедри, геодезії картографії та
управління територіями
Сабадаш В.І.

*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: "Підвищення точності геоприв'язки растрових топографічних матеріалів у середовищі ГІС на основі тахеометричних вимірювань (на прикладі території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації)".

Метою дослідження є оцінка точності прив'язки растрових топографічних матеріалів у середовищі QGIS з використанням різних типів трансформацій. Здійснено геоприв'язку топографічного плану території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації. Проаналізовано різні моделі трансформації та визначено оптимальний метод для роботи з планами масштабу 1:500.

Ключові слова: геоприв'язка, QGIS, тахеометр, трансформація, растрове зображення.

ABSTRACT

Qualification work of a 2nd-year student of group 208-M, majoring in 193 "Geodesy and Land Management" of the second (master's) level of higher education, on the topic: "Improving the Accuracy of Georeferencing Raster Topographic Materials in a GIS Environment Based on Tacheometric Measurements (Using the Example of the Residence of the Metropolitans of Bukovina and Dalmatia)".

The aim of the study is to assess the accuracy of georeferencing raster topographic materials in the QGIS environment using various types of transformations. The georeferencing of the topographic plan of the territory of the Residence of the Metropolitans of Bukovina and Dalmatia was carried out. Different transformation models were analyzed, and the optimal method for working with 1:500 scale plans was determined.

Keywords: georeferencing, QGIS, tacheometer, transformation, raster image.

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

Владислав Кваснецький

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ І. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОПРИВ'ЯЗКИ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ.....	7
1.1 Сутність геоприв'язки в ГІС.....	7
1.2 Джерела геопросторових даних.....	10
1.3 Геоприв'язка у середовищі QGIS.....	17
Висновки до розділу 1.....	20
РОЗДІЛ ІІ. ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ.....	22
2.1 Теоретичні основи тахеометричної зйомки та характеристика обладнання.....	22
2.2 Оцінка точності та критерії похибок.....	25
2.3 Експериментальний метод (польові геодезичні вимірювання).....	26
2.4 Метод тріангуляції.....	27
2.5 Метод геоінформаційного аналізу.....	29
2.6 Порівняльний аналіз методів прив'язки.....	30
2.7 Метод логічного узагальнення результатів.....	33
Висновки до розділу 2.....	34
РОЗДІЛ ІІІ. ОСОБЛИВОСТІ ГЕОПРИВ'ЯЗКИ ТОПОПЛАНУ В СЕРЕДОВИЩІ ГІС НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ РЕЗИДЕНЦІЇ МИТРОПОЛИТІВ БУКОВИНИ ТА ДАЛМАЦІЇ.....	36
3.1 Алгоритм геопросторової прив'язки топографічного плану.....	36
3.2 Підготовка та виконання польового етапу дослідження.....	39
3.3 Порівняння методів трансформування растру програми QGIS.....	47
3.4 Аналіз точності прив'язки растру на основі даних, отриманих у ході польових робіт.....	50
3.5 Порівняння точності прив'язки по супутниковому знімку та отриманих в результаті дослідження даних.....	54
Висновки до розділу 3.....	57
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

ВСТУП

Актуальність теми визначається потребою підвищення точності геоприв'язки растрових матеріалів у сучасних ГІС-технологіях, зокрема при роботі з картографічними документами крупного масштабу. Геоприв'язка є основою просторового аналізу, а її якість визначає достовірність усіх подальших геодезичних і картографічних операцій. В умовах зростання обсягів цифрових картографічних даних та широкого використання QGIS виникає необхідність науково обґрунтованого вибору оптимального методу трансформації та визначення точності різних джерел координат – польових вимірювань та супутникових даних.

Сучасні геоінформаційні технології посідають ключове місце в системі обробки, аналізу та інтерпретації просторових даних, забезпечуючи можливість інтеграції різнорідних джерел інформації та виконання високоточного картографічного моделювання. Важливим завданням ГІС-технологій є встановлення просторової відповідності між растровими матеріалами та реальною геометрією території, що досягається шляхом геоприв'язки. Якість цієї процедури визначає точність подальших геодезичних, інженерних, кадастрових та картографічних робіт і є критично важливою для досліджень крупного масштабу, де навіть незначні похибки можуть призвести до суттєвих викривлень просторової моделі.

У контексті роботи з топографічними планами особливого значення набуває можливість оцінки точності різних методів прив'язки, оскільки вихідні картографічні матеріали, супутникові знімки та результати польових вимірювань характеризуються різним рівнем метричної достовірності. У середовищі QGIS реалізовано широкий спектр трансформаційних моделей – від базових лінійних алгоритмів до поліноміальних перетворень та тонкостінних сплайнів, які дозволяють адаптувати геометрію растру до координатної основи. Однак вибір оптимальної моделі та набору опорних точок потребує наукового обґрунтування та порівняльної оцінки їх результативності.

Таким чином, робота спрямована на комплексне вивчення процесу геоприв'язки та оцінку точності трансформаційних моделей у QGIS, що має важливе значення для забезпечення надійності геопросторових досліджень та підвищення якості картографічних продуктів.

Мета дослідження – оцінити точність прив'язки растрових зображень у середовищі QGIS з використанням різних типів трансформацій та різних джерел координат, а також визначити оптимальний метод геоприв'язки для задач крупного масштабу.

Об'єкт дослідження – процес геоприв'язки растрових зображень у ГІС-середовищі для території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації.

Предмет дослідження – точність трансформаційних моделей та просторових прив'язок у QGIS за різними джерел координат та кількості контрольних точок.

Для досягнення мети було поставлено та вирішено такі **завдання**:

1. Провести польові геодезичні вимірювання для визначення координат опорних точок на прикладі території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації.
2. Виконати геоприв'язку растрового плану використовуючи ГІС за двома підходами (за польовими координатами та за супутниковими знімками).
3. Оцінити точність прив'язки растрової інформації для різних трансформаційних моделей у QGIS.

Для реалізації поставлених завдань було застосовано комплекс наукових **методів**, що поєднує польові геодезичні вимірювання для отримання точних координат опорних точок, використання методу тріангуляції з метою побудови локальної координатної мережі, а також геоінформаційний аналіз у середовищі QGIS, що забезпечило виконання геометричної трансформації та оцінку похибок. Додатково було проведено математико-статистичний аналіз для визначення RMS-похибок і встановлення статистичних залежностей, а порівняльний аналіз дав змогу зіставити ефективність різних способів прив'язки.

На завершальному етапі застосовано метод логічного узагальнення, що дозволив сформулювати підсумкові висновки та практичні рекомендації.

Наукова новизна роботи полягає у оцінці точності прив'язки растрового зображення топографічного плану масштабу 1:500 та визначені оптимального методу трансформації та геоприв'язки для території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації, використовуючи сучасні прилади та програмного забезпечення.

Практичне значення полягає у можливості застосування отриманих результатів для вибору оптимального методу прив'язки під час роботи з топографічними планами великих масштабів, що сприяє підвищенню точності геодезичних і картографічних робіт. Отримані положення можуть бути використані у навчальному процесі під час вивчення дисциплін з геоінформаційних систем, геодезії та картографічного моделювання, а також слугувати основою для розробки алгоритмів автоматизованої оцінки точності геоприв'язки, що є актуальним для сучасних цифрових технологій опрацювання геоданих.

РОЗДІЛ І. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОПРИВ'ЯЗКИ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ.

1.1 Сутність геоприв'язки в ГІС.

Географічна інформаційна система (ГІС) – це система, що забезпечує збирання, зберігання, опрацювання, доступ, відображення і поширення просторово координованих даних. Інформацію у середовищі ГІС подають у вигляді електронних карт, які налічують графічну складову (межі територій або місцезнаходження об'єктів) і пов'язану з ними атрибутивну інформацію (текстову, числову та аудіовізуальну). ГІС-технології останніми роками активно впроваджують у різні галузі господарства, у системи державного і корпоративного управління, в науку і освіту, адже близько 80 % інформації сучасного суспільства має географічну складову (координатне прив'язування до конкретної території або до її моделі – карти). Обсяг такої інформації з кожним роком збільшується, а вимоги до її опрацювання для обґрунтування ухвалення управлінських рішень стають щораз жорсткішими. Сьогодні ефективний і оперативний аналіз такої інформації зараз вже неможливий без використання сучасних досягнень геоінформаційних технологій.

Головною властивістю об'єктів, відображених у геоінформаційних системах, є наявність інформації про них та можливість проведення ї різних операцій з ними. Всі дані стосовно об'єктів необхідно систематизувати та структурувати, що вимагає створення банку чи бази даних. Значні за обсягом масиви інформації і впорядковані дані мають вигляд структурованих систем або систем з реляційними зв'язками. У геоінформаційних системах найчастіше застосовують реляційні бази даних, найпростішим видом яких є таблиці у вигляді матриці. Існує чимало програм створення баз даних (dBase, Oracle, Access і т. д.), адаптованих до передавання атрибутів геопросторових об'єктів. Значної уваги заслуговують об'єктно-орієнтовані бази даних, оскільки в них значення відповідає просторовій одиниці. За таких обставин можемо

застосовувати геоінформаційне моделювання, що опирається на бази даних і систему географічних знань. Одні інтегрують цифрові картографічні, аерокосмічні, статистичні та інші геодані, які відображають просторове розміщення, стан і відношення географічних об'єктів, а інші містять сукупності логічних правил, інформації, концепцій, що необхідні для моделювання та прийняття рішень. [1, 2]

Особливістю ГІС вважають наявність у їхньому складі специфічних методів аналізу просторових даних, які в сукупності з засобами введення, зберігання, маніпулювання та представлення просторово-координованої інформації становлять основу технологій географічних інформаційних систем, або ГІС-технологій. Саме сукупність специфічних методів аналізу, які здатних генерувати нові знання з використанням як просторових, так і непросторових атрибутів, і визначає головну відмінність ГІС-технологій від технологій, наприклад, автоматизованого картографування або систем автоматизованого проектування. Просторова і дискретна інформація є доволі різноманітною. Це можуть бути аерофотознімки, сателітні знімки, група наземних контурів, наприклад, ґрунтових, цифрові карти ґрунтового покриття певної території, ізогіпси, спеціальні записи з реєстру прав власності на землю тощо.

Координатна прив'язка геопросторових даних (топографічних та тематичних карт, аерокосмічних знімків, планів, схем тощо) у середовищі програмних продуктів ГІС є необхідною, передусім для забезпечення можливості виконання просторових розрахунків та відображення об'єктів, процесів і явищ. Суть цього процесу полягає у присвоєнні та геометричній трансформації координат вихідної інформації відповідності до системи координат та проекції. Дещо складнішою є процедура геометричної корекції аерокосмічних знімків, яку виконують для того, щоб зображення земної поверхні було правильно представленим на площині та мало властивості карти. Складність цієї процедури вимагає вирішення низки взаємопов'язаних завдань. Передусім необхідно забезпечити можливість виявлення змін на різночасових

знімках однієї і тієї ж території, що потребує попиксельного зіставлення зображень. Важливим є також формування мозаїк та фотокарт, інтеграція отриманих знімків у геоінформаційні системи разом із векторними даними, а також отримання точних значень відстаней і площ. Крім того, процедура повинна забезпечувати коректну локалізацію даних, необхідну для виконання різноманітних видів географічного аналізу. [3, 4]

У деяких випадках геометричної корекції потребують топографічні карти внаслідок їхнього неналежного зберігання. Для корекцій зміщень зображень об'єктів місцевості за рахунок рельєфу, якщо маємо цифрову модель рельєфу (ЦМР), застосовують операцію ортотрансформації, яку рекомендують виконувати для знімків гірської місцевості, що потребує високої точності координування. Розрізняють два основні випадки використання трансформування системи координат: сітку рядків і стовпців растрового зображення необхідно змінити у відповідно до обраної та використовуваної проєкції і системи координат. Найчастіше трансформацію використовують для перетворення даних, що не співставляються, в одну і ту ж картографічну сітку координат. За відсутності спотворень зображень трансформацію можна не виконувати. Наприклад, під час сканування знімка або карти в потрібній проєкції виконується лише координатна прив'язка. Загалом, за невизначених властивостей зображення його трансформацію з однієї системи координат в іншу здійснюють за допомогою поліномів n -го порядку, що дають змогу обчислити координати нової сітки рядків і стовпців для комірок вихідного зображення на основі координат заданих контрольних точок. Цей процес включає вибір способу трансформування, локалізацію контрольних точок, розрахунок похибок і оцінку результатів трансформації, а також перевизначення значень комірок і формування вихідного файлу зображення з новою координатною інформацією у заголовку або в окремому файлі. [5, 6]

Для вибору контрольних точок на площині геопросторових даних необхідно зважити на такі правила:

- їхня кількість повинна бути достатньою для обраного способу трансформування і задовольняти умову (1.1):

$$n > \frac{(n+1) \times (n+2)}{2} \quad (1.1),$$

де n – степінь полінома;

- точки необхідно розташовувати рівномірно по всьому полю зображення: чим рівномірніше, тим надійнішим є результат трансформування;
- не варто використовувати мінливі об'єкти місцевості (береги озер, межі рослинності тощо).

Наступною є процедура створення вихідного файла зображення під час збереження структури яскравості вихідного зображення. При цьому необхідно перевизначити значення яскравості комірок відповідно до їхнього нового положення, оскільки їхня сітка у вихідному зображенні може мати іншу роздільну здатність і спрямованість осей. Згідно з растровою технологією, трансформоване зображення заповнюється комірка за коміркою пострічково. Процедура перевизначення значень комірок полягає в отриманні значень яскравості комірки вихідного зображення з координатами (x, y) і присвоєнню її комірці, розташованій у найприйнятнішій точці з відповідними координатами (x, y) у новій сітці. [7]

1.2 Джерела геопросторових даних.

Геопросторові дані є основою будь-якого картографічного, геодезичного або геоінформаційного дослідження, оскільки вони відображають положення, форму та характеристики об'єктів у просторі. У контексті геоприв'язки растрових зображень саме різні види геопросторових даних забезпечують можливість поєднання картографічних матеріалів із результатами польових вимірювань та супутникових спостережень. Ключовим аспектом їх використання є точність, походження та спосіб отримання, адже ці фактори безпосередньо впливають на достовірність кінцевих результатів обробки.

Одним із найпоширеніших типів джерел є растрові дані, до яких належать топографічні плани, аерофотознімки та супутникові зображення. Растрові матеріали отримуються шляхом сканування картографічних документів або дистанційного зондування поверхні Землі, у результаті чого формується двовимірна матриця пікселів.

Топографічні плани масштабів 1:500 – 1:5000 використовуються як основа для побудови детальних картографічних моделей території, однак потребують геометричної корекції та прив'язки до сучасних систем координат. Супутникові знімки, попри їхню високу інформативність та актуальність, часто мають системні та локальні зміщення, що обмежує їх застосування у завданнях високої точності. В окремих випадках супутникові дані використовуються як попередній орієнтир або додаткове джерело для візуального контролю.

Топографічний план використовується для геодезичного забезпечення територій досліджень шляхом надання точного, масштабованого зображення місцевості з усіма її елементами, що дозволяє: проводити вимірювання відстаней, площ та висот; визначати координати об'єктів; планувати та розміщувати об'єкти на ділянці; отримувати дані для подальшого проектування та кадастрового обліку.

Топографічний план виконує низку важливих функцій, що забезпечують його комплексне застосування у геодезичних, проектних та аналітичних роботах. Він містить систематизовані відомості про рельєф місцевості, гідрографічну мережу, ґрунтово-рослинний покрив, елементи забудови, інженерні мережі та транспортну інфраструктуру, надаючи базові вихідні дані для подальших досліджень і розрахунків. На його основі виконуються геодезичні вимірювання – визначення відстаней, площ, висотних відміток та напрямків, що забезпечує точний аналіз просторових характеристик території. Топоплан також слугує основою для планування й проектування під час будівництва, реконструкції, благоустрою чи ландшафтного опрацювання, надаючи проектувальникам достовірну інформацію про природні та антропогенні умови ділянки. Крім того,

він дозволяє встановлювати точні географічні та прямокутні координати характерних об'єктів, що є необхідним для коректного виконання геодезичних і картографічних робіт. Окремо топографічний план може використовуватися як вихідна основа для створення тематичних карт різного призначення, які застосовуються в господарській діяльності, екологічному аналізі, містобудуванні та інших сферах.

Топографічний план місцевості є схемою земельної ділянки (графіка) із зазначенням всіх важливих і необхідних параметрів рельєфу. Топоплан – це графічне зображення поверхні земельної ділянки в метричній формі. Без наявності топоплану не можна розпочинати будівництво, реконструкцію та ландшафтні роботи. Топографічний план місцевості обов'язково має бути складений на папері, цифровий варіант може бути як доповнення. Використовуваний масштаб зазвичай дорівнює 1:500 або 1:000. Варіантів масштабування багато, він вибирається відповідно до конкретного завдання та технічного завдання. [8]

В основі топографічного плану лежать дані топографічної зйомки, результати якої формують графічне відображення території. До його ключових елементів належать рельєф місцевості, водні об'єкти, ґрунтово-рослинний покрив, інженерні комунікації, будівлі та споруди, а також елементи дорожньої мережі.

Умовні знаки та позначення в топографії представляють собою графічні малюнки відповідного розміру, форми та кольору. Умовні позначення на топографічній карті потрібні для відображення на ній об'єктів місцевості, а саме річок, озер, населених пунктів, автомобільних доріг тощо. Також топографічні позначки відображають об'єкти гірничих розробок, наприклад промислові споруди, електропостачання, комунікації тощо.

Топографічне знімання, зокрема великих масштабів, є важливим видом геодезичних робіт. Потреби в ньому виникають у випадку створення чи оновлення топокарт, складання генпланів, робочих креслень, вирішення

вертикального планування та проектування ландшафтного дизайну. На основі топографічного знімання можна побудувати цифрову модель місцевості.

Аерофотознімки та супутникові знімки посідають одне з провідних місць серед джерел геопросторових даних, оскільки вони забезпечують високий рівень деталізації території, оперативність оновлення та широкий спектр можливостей для подальшої обробки в геоінформаційних системах. Їхня роль у сучасній геодезії, картографії та дистанційному зондуванні Землі зумовлена здатністю відображати природні та антропогенні об'єкти у їх реальному положенні та поточному стані. Цей тип даних широко використовується як для аналітичних задач, так і як вихідна основа для створення топографічних карт, тематичного картографування, моніторингу територій та геоприв'язки растрових матеріалів.

Аерофотознімки отримують шляхом фотографування поверхні Землі з літальних апаратів – літаків, гвинтокрилів або безпілотних авіаційних систем. Завдяки відносно низькій висоті польоту та можливості регулювання параметрів зйомки аерофотознімки відзначаються високою роздільною здатністю, що дозволяє детально фіксувати дрібні елементи місцевості, включно з будівлями, дорожньою інфраструктурою, малими формами рельєфу та окремими природними об'єктами. Аерофотозйомка також забезпечує можливість виконання стереофотограмметричної обробки, яка дозволяє отримувати тривимірні моделі місцевості та визначати координати точок з високою точністю. Однак аерофотознімки характеризуються залежністю від погодних умов, вартості польотів та тривалості підготовки, що обмежує їх використання у деяких практичних завданнях.

Супутникові знімки, на відміну від аерофотознімків, охоплюють значно більші території та доступні у широкому спектрі просторів і умов спостереження. Зображення з космічних апаратів формуються з різною роздільною здатністю – від високої (0,3–2 метри), яка підходить для детальних картографічних робіт, до середньої та низької, що використовується в екологічному моніторингу, аналізі кліматичних процесів та оглядових

дослідженнях великих територій. Основною перевагою супутникових знімків є їхня регулярна актуалізація, що дозволяє відстежувати зміни на поверхні Землі у динаміці. Водночас існує низка обмежень: залежність від атмосферних умов, наявність хмарності, системні та проєкційні деформації, а також зміщення об'єктів від їхнього фактичного місця, що може досягати кількох метрів.

У контексті геоприв'язки растрових зображень аерофото- та супутникові дані виконують функцію опорного орієнтування, дозволяючи зіставити картографічний матеріал з реальним виглядом території. Вони допомагають визначати загальне положення об'єктів і візуально контролювати результати трансформації. Проте з позицій метричної точності ці дані не завжди можуть служити джерелом для створення високоточної прив'язки, особливо в крупних масштабах. Аерофотознімки зазвичай мають менші деформації, проте потребують складної фотограмметричної обробки, тоді як супутникові зображення, незважаючи на легкість доступу, часто містять зміщення, зумовлені орбітальними характеристиками, алгоритмами обробки та загальними інструментальними похибками. [9]

Тому у геоінформаційних дослідженнях аерофото- та супутникові знімки найчастіше виступають не основним, а допоміжним джерелом інформації, що забезпечує візуальну складову, орієнтування та попереднє позиціонування. Їхня цінність полягає у наданні актуальної та повної картини території, але для задач високої точності вони повинні використовуватися у поєднанні з точними польовими вимірюваннями, GNSS або тахеометричними даними. Такий комплексний підхід дає змогу компенсувати системні спотворення та досягти максимальної геометричної узгодженості картографічних матеріалів.

Векторні дані належать до фундаментальних типів геопросторової інформації, які моделюють об'єкти реального світу шляхом використання математично точних геометричних примітивів – точок, ліній та полігонів. На відміну від растрових даних, де територія представлена як регулярна сітка пікселів, векторна модель відображає форму об'єктів з високою точністю і не

містить зайвої інформації, що робить її особливо цінною у задачах, пов'язаних із просторовими обчисленнями, аналітикою та синтезом геоданих.

Ключовою характеристикою векторної моделі є те, що кожен об'єкт має чітко визначену геометрію та набір атрибутів. Точкові об'єкти використовуються для представлення дискретних позицій у просторі – наприклад, геодезичних пунктів, межових знаків, будівельних кутів або центрів об'єктів інфраструктури. Лінійні об'єкти описують протяжні структури, такі як дороги, річки, лінії електропередач чи контури рельєфу. Полігональні об'єкти відображають площинні утворення: межі земельних ділянок, контури будівель, орографічні елементи та адміністративні зони. Такий підхід дозволяє створювати математично строгі просторові моделі, які можуть бути інтегровані у будь-яку систему координат та трансформовані без втрати геометричної точності.

Однією з ключових переваг векторних даних є здатність зберігати просторову точність незалежно від масштабу відображення. Це означає, що навіть при багаторазовому збільшенні або трансформації карти геометрія об'єктів залишається такою ж точною, як і в оригінальному наборі даних. Саме тому векторна модель широко використовується в кадастрі, інженерній геодезії, проєктуванні та інших галузях, де важливою є математична коректність просторових об'єктів.

Крім геометричної складової, векторні дані містять атрибутивну інформацію, що дає змогу виконувати аналітичні операції та запити. Наприклад, атрибути можуть включати площу полігону, категорію землекористування, назву дороги, відмітки висот або точність координат пунктів. ГІС-додатки забезпечують можливість роботи з цією інформацією, здійснюючи фільтрацію, просторові запити, класифікацію, топологічний аналіз та побудову мережевих моделей. Завдяки поєднанню геометрії та атрибутів векторні дані стають універсальною структурою для складних аналітичних задач.

У контексті геоприв'язки растрових зображень векторні дані відіграють роль еталонного шару, який задає точну геометрію або координатні прив'язки.

Наприклад, координати геодезичних пунктів, представлені у векторному форматі, використовуються для верифікації точності трансформаційних моделей у QGIS. Лінійні й полігональні об'єкти дозволяють здійснювати візуальний контроль суміщення растрових шарів, зокрема перевірку правильності накладення контурів будівель, доріг або меж ділянок. Таким чином, векторні дані забезпечують не лише можливість аналізу, але й формують основу для точнісної оцінки результатів геоприв'язки.

Окреме значення має топологія векторних даних – система правил, яка визначає просторові відношення між об'єктами: суміжність, перетин, вкладеність, неперервність лінійних об'єктів. Топологічна коректність забезпечує цілісність векторної моделі та виключає появу логічних помилок, таких як розриви ліній, самоперетини полігонів або накладання меж. У задачах геоприв'язки топологічні правила дозволяють перевірити правильність трансформації та уникнути викривлення просторових структур, що особливо важливо при роботі з великомасштабними планами.

Завдяки своїй точності, структурованості та можливості інтеграції з іншими типами даних векторна модель є невід'ємним компонентом сучасних геоінформаційних систем. У поєднанні з високоточними польовими вимірюваннями та растровими матеріалами вона забезпечує створення узгодженої просторової бази, необхідної для геокодування, картографування та оцінки точності геоприв'язки. У цьому сенсі векторні дані виступають ключовим інструментом, який підвищує точність та надійність геоінформаційних досліджень.

Особливе значення для задач високої точності мають дані польових геодезичних вимірювань, зокрема отримані за допомогою GNSS-приймачів та електронних тахеометрів. GNSS забезпечують глобальне позиціонування, однак у складних умовах рельєфу або щільної забудови їхня точність може знижуватися. Тахеометричні вимірювання, навпаки, дозволяють отримати координати з сантиметровою точністю, що робить їх ключовим джерелом даних

для точної геоприв'язки растрових планів. Координати опорних точок, визначених у результаті тахеометричної зйомки, є найнадійнішою основою для контролю геометрії растру, оцінки точності трансформації та верифікації супутникових матеріалів.

Додатковим джерелом просторової інформації можуть виступати відкриті картографічні сервіси, такі як Google Maps, Bing Maps чи OpenStreetMap. Хоча вони забезпечують зручний доступ до візуальної інформації про територію, їх позиційна точність є недостатньою для інженерних або наукових робіт крупного масштабу. Тому такі сервіси частіше застосовуються як допоміжні інструменти для орієнтування або попередньої просторової оцінки.

У цілому різні джерела геопросторових даних доповнюють одне одного, формуючи комплексну інформаційну основу для геоприв'язки та аналізу. Комбінація растрових матеріалів, даних дистанційного зондування та високоточних польових вимірювань забезпечує можливість створення узгодженої моделі території та оцінки похибок трансформації. Саме якісна взаємодія цих джерел визначає достовірність результатів і ефективність геоінформаційних технологій у практичних застосуваннях.

1.3 Геоприв'язка у середовищі QGIS.

QGIS – географічна інформаційна система з відкритим кодом. Розповсюджується на умовах GNU General Public License. QGIS є проектом Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Вона працює на таких операційних системах як Linux, Unix, MacOS, Windows. За допомогою неї можна відображати, управляти, редагувати, аналізувати дані, готувати друковані карти.

QGIS підтримує широкий спектр форматів та функціональних можливостей, що дозволяють працювати з різними типами просторових даних. Програма забезпечує імпорт, відображення та редагування векторних даних, включно з форматами PostGIS, SpatiaLite, MS SQL Spatial, Oracle Spatial, а також численними форматами, які підтримує бібліотека OGR, такими як ESRI

Shapefile, MapInfo, SDTS, GML та інші. Растрові дані обробляються за допомогою бібліотеки GDAL, що дозволяє працювати з GeoTIFF, ERDAS IMG, ArcInfo ASCII GRID, JPEG, PNG та багатьма іншими форматами. Окремо доступна повноцінна робота з векторними й растровими даними GRASS GIS.

Програма також забезпечує доступ до інтернет-просторових сервісів і може використовувати WMS, WMTS, WCS, WFS та WFS-T як клієнт або сервер. QGIS дозволяє створювати та редагувати шейп-файли, геокодувати зображення, використовувати GPS-інструменти для імпорту, експорту та конвертації даних GPX та інших GPS-форматів, а також інтегрувати й редагувати дані OpenStreetMap. За допомогою плагіна DB Manager можна створювати просторові таблиці в базах даних на основі шейп-файлів та ефективно керувати їх структурою.

Крім того, QGIS має потужні засоби для аналізу просторових даних, зокрема через інтеграцію з більш ніж 400 модулями GRASS GIS, що дозволяють виконувати різноманітні геопросторові операції. Система також підтримує публікацію карт у веб середовищі за допомогою таких рішень, як MapServer або GeoServer, забезпечуючи можливість доступу до геоданих через стандартні OGC-сервіси.

Georeferencer – це інструмент для вирівнювання растрових або векторних шарів з відомими системами координат за допомогою наземних контрольних точок (GCP). Він підтримує експорт трансформованих растрів (GeoTIFF) та векторів (шейп-файлів, геопакетів тощо) або запис супровідних файлів світу (лише для растра). Основний підхід до геореференції шару полягає у визначенні на ньому точок, для яких можна точно визначити координати.

Доступний ряд алгоритмів перетворення, залежно від типу та якості вхідних даних, характеру та ступеня геометричних спотворень, які ви бажаєте внести до кінцевого результату, а також кількості наземних контрольних точок (GCP).

Наразі в QGIS Georeferencer доступні кілька типів трансформацій, кожен із яких призначений для різних умов та якості вихідних зображень. Лінійний алгоритм фактично не змінює растрові пікселі: він лише виконує зміщення та рівномірне масштабування зображення, не допускаючи обертання чи складніших перетворень. Такий підхід оптимальний для високоякісних растрових карт у відомій системі координат, яким бракує лише геоприв'язки. Перетворення Гельмерта, на відміну від лінійного, дозволяє виконувати також обертання, тому добре підходить для якісних локальних карт або орторектифікованих аерофотознімків, що потребують вирівнювання відносно координатної сітки. [10]

Поліном 1 забезпечує афінне перетворення, у якому прямі лінії залишаються прямими, а паралельні – паралельними, що робить його придатним для картограм або даних з нерівномірними розмірами пікселів у різних напрямках. Поліноміальні перетворення 2-го та 3-го степенів дозволяють компенсувати кривизну та інші систематичні деформації, наприклад ті, що виникають при зйомці вигнутих або старих карт. Однак такі алгоритми можуть спричиняти значні спотворення, особливо на краях зображення або в зонах, віддалених від опорних точок.

Проективне перетворення є узагальненням афінного і моделює ефект центральної проекції, коли прямі лінії залишаються прямими, але паралельність втрачається, а масштаб змінюється залежно від перспективи. Воно використовується переважно для геоприв'язки знімків, зроблених під кутом. Алгоритм Thin Plate Spline забезпечує «розгладжування» растру за допомогою локальних поліномів таким чином, щоб він максимально точно відповідав опорним точкам, мінімізуючи при цьому загальну кривизну поверхні. TPS є найбільш ефективним для сильно деформованих, пошкоджених або неточно відзнятих карт, а також для приблизної прив'язки матеріалів із невідомими параметрами проекції за умови наявності достатньої кількості GCP.

У всіх алгоритмах, окрім TPS, якщо вказано більше GCP, ніж мінімальна кількість, параметри будуть підібрані таким чином, щоб мінімізувати загальну залишкову похибку. Це корисно для мінімізації впливу помилок реєстрації, тобто незначних неточностей у кліках вказівника або введених координатах, або інших невеликих локальних деформацій зображення. За відсутності інших GCP для компенсації такі помилки або деформації можуть призвести до значних спотворень, особливо поблизу країв геоприв'язаного зображення. Однак, якщо вказано більше GCP, ніж мінімальна кількість, вони будуть збігатися лише приблизно на виході. Натомість, TPS точно збігатиметься з усіма вказаними GCP, але може вносити значні деформації між сусідніми GCP з помилками реєстрації. [11]

Висновки до розділу 1.

Проведений у першому розділі аналіз теоретичних засад геоприв'язки засвідчив, що точність просторового позиціонування растрових матеріалів є критично важливою для сучасних геодезичних, картографічних та геоінформаційних досліджень. Геоприв'язка забезпечує встановлення однозначної відповідності між піксельною структурою зображення та координатною основою, що дозволяє інтегрувати картографічні, супутникові, польові та інші джерела геопросторових даних у єдиному середовищі ГІС. Доведено, що якісна прив'язка є необхідною умовою виконання просторового аналізу, вимірювань, моделювання, побудови тематичних карт і проведення інженерних робіт.

Також було окреслено особливості різних типів геопросторових даних – растрових, векторних та польових – їхні переваги й обмеження. Показано, що точність кінцевих результатів значною мірою залежить від якості джерел і правильного вибору трансформаційних моделей, які реалізуються в QGIS: лінійних, афінних, поліноміальних, проєктивних та алгоритмів типу

тонкостінного сплайну. Ключовим фактором виступає також правильний вибір і рівномірний розподіл контрольних точок, оскільки локальні або систематичні похибки можуть спричинити значні спотворення растру.

Таким чином, теоретичний розділ формує фундаментальне підґрунтя для практичної частини дослідження, визначаючи методологічні умови точного та надійного виконання геоприв'язки. Узагальнені поняття, технології та підходи забезпечують наукову базу для аналізу точності різних методів прив'язки та обґрунтування вибору оптимального алгоритму трансформації у подальших розділах роботи.

РОЗДІЛ II. ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ЦІЛЕЙ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

2.1 Теоретичні основи тахеометричної зйомки та характеристика обладнання.

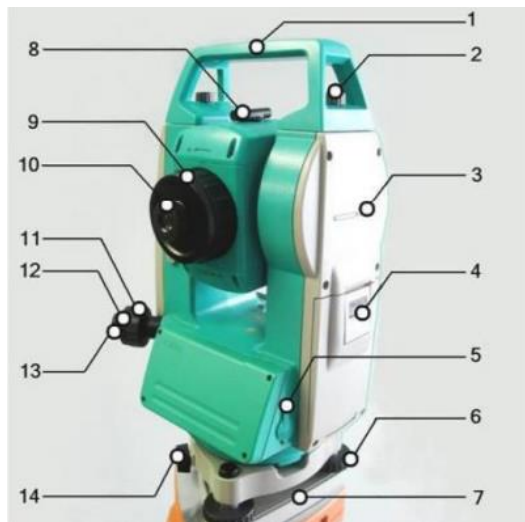
Сучасна геодезична наука і практика використовує різноманітні електронні та механічні геодезичні прилади. Але нині переважна більшість геодезистів схиляється до використання саме електронних приладів. Це пояснюється тим, що електронні геодезичні прилади дозволяють суттєво підвищити як точність, так і швидкість виконання робіт. Окрім цього, завдяки тому, що електронні геодезичні прилади обладнані пам'яттю, суттєво полегшується процес експорту результатів знімання в середовище програм обробки результатів геодезичних спостережень, а також систем автоматизованого проектування і геоінформаційних систем. До електронних геодезичних приладів належать: електронні теодоліти, нівеліри, тахеометри, рулетки, які фактично є модифікованими аналогами традиційних механічних інструментів. До класу електронних геодезичних приладів відносяться також приймачі глобальних супутникових навігаційних систем (GNSS-приймачі), трасошукачі, вертикальні побудовники, лідари. Виробництвом та дистрибуцією електронних геодезичних приладів займаються такі підприємства, як ІКПЗ (Ізюмський приладобудівний завод), Sokkia, Trimble, Leica, Foif, South, Vega, Carl Zeiss, Topcon, Focus, Nikon.

При проведенні більшості геодезичних робіт, як правило, потрібно виконувати як кутові, так і лінійні виміри, для чого зазвичай використовувалися оптичні тахеометри. Ще наприкінці XX століття угорський геодезист Тихі ввів поняття «тахеометр», яке в перекладі з грецької мови означає «швидковимірюючий». У сучасні прилади почали вбудовувати польові комп'ютери для обробки результатів вимірювань і вирішення безпосередньо в полі типових геодезичних задач, розширилися потенційні можливості приладів за рахунок значного поліпшення технічних характеристик. Таким чином на заключній стадії розвитку електронних геодезичних приладів стоїть універсальний інструмент – електронний тахеометр, який не випадково займає

міцне місце в ряду приладів геодезичного обладнання. Тахеометр виробляє будь які кутомірні вимірювання одночасно з вимірюванням відстаней і за отриманими даними проводять інженерні обчислення, зберігаючи всю отриману інформацію. За допомогою електронного тахеометра в польових умовах можна отримати інформацію про вимірювальні горизонтальні і вертикальні кути і відстані, автоматично виконати необхідні обчислення по плановому і висотному положенню ситуації. При наявності комп'ютера процес може бути автоматизований, включаючи одержання готової карти місцевості за лічені хвилини. Можливість занесення в запам'ятовуючий пристрій допустимих похибок вимірювань (наприклад, циклічної похибки далекоміра, колімаційної похибки, відхилення від місця нуля, відхилення осі обертання від стрімкої лінії за рахунок введення двухкоординатного електронних рівнів та ін.). Це дозволяє підвищити точність і продуктивність вимірювань. Вбудоване програмне забезпечення дозволяє виконати наступні геодезичні завдання: зворотну зарубку, зрівнювання теодолітного ходу, обчислення площ, розбивку кривих. [11, 12]

На Українському ринку тахеометри представляють сьогодні такі відомі фірми, як Leica-Geosystems (Швейцарія), Sokkia, Topcon, Nikon і Pentax (Японія), South (Китай), Trimble Navigation (США), GeoMax (Швеція) та ін.

Тахеометр включає в себе: електронний теодоліт (кутомір); електронний далекомір; GPS-приймач (додатково); обчислювальний пристрій з пам'яттю, для вимірювання похилих відстаней до заданих точок, горизонтальних і вертикальних кутів, та перетворення результатів із сферичної до декартової системи координат. У лазерних далекомірах відстані вимірюються: по різниці фаз випущеного і відбитого променя (фазовий лазерний далекомір); за часом проходження променя лазера до відбивача і назад (імпульсний лазерний далекомір). Будова електронного тахеометра Sokkia SET610 показана на рисунках 2.1 та 2.2.



- 1- ручка
- 2 - закріпний гвинт
- 3 - мітка висоти інструмента
- 4 - слот для батареї
- 5 - розйом введення/виведення даних
- 6 - підйомний гвинт
- 7 – основа трегера
- 8 - грубий візир
- 9 - фокусуюче кільце зорової труби
- 10 - окуляр зорової труби
- 11 - діоптрійне кільце оптичного центриру
- 12 - кришка сітки ниток оптичного центриру
- 13 - окуляр оптичного центриру
- 14 – защолка трегера

Рис. 2.1 Будова електронного тахеометра Sokkia SET610



- 15 - паз для встановлення бусолі
- 16 - навідний гвинт вертикального круга
- 17- закріпний гвинт вертикального круга
- 18- навідний гвинт горизонтального круга
- 19- закріпний гвинт горизонтального круга
- 20- об'єктив
- 21- циліндричний рівень
- 22- юстирувальні гвинти циліндричного рівня
- 23-панель управління

Рис. 2.2 Будова електронного тахеометра Sokkia SET610

Точність кутових вимірів сучасним тахеометром досягає половини секунди ($0^{\circ}00'00,5''$), відстаней – до 0,5 (1) мм + 1 мм на км. Точність лінійних вимірювань в безвідбивному режимі – до 1 мм + 1 мм на км. Більшість сучасних тахеометрів обладнані обчислювальним і запам'ятовуючим пристроєм, що дозволяє зберігати виміряні або проектні дані, обчислювати координати точок, недоступних для прямих вимірювань, за приймачем (наприклад, Leica Smart Station). [13, 14, 15]

2.2 Оцінка точності та критерії похибок.

Оцінка точності є одним із ключових елементів будь-якого геодезичного, картографічного чи геоінформаційного дослідження, оскільки достовірність просторової моделі напряму залежить від величини та характеру похибок, що виникають у процесі збору, обробки та трансформації даних. Точність розглядається як ступінь відповідності отриманих значень їхнім істинним або еталонним величинам, а її кількісна характеристика ґрунтується на математично-статистичних підходах та теорії похибок вимірювань. Для коректного аналізу важливо враховувати як випадкову, так і систематичну складову похибок, адже саме їх взаємодія визначає якість кінцевого просторового продукту.

У теорії точності важливе значення має також поділ похибок на систематичні та випадкові. Систематичні похибки спричиняють зміщення всіх вимірювань у певному напрямі та, як правило, зумовлені некоректними параметрами приладу, спотвореннями проєкції, впливом рефракції або невірно визначеною системою координат. На відміну від них випадкові похибки є непередбачуваними та залежать від умов вимірювань, людського фактора, точності наведення та інших чинників. Зменшення випадкової складової досягається шляхом підвищення точності вимірювальних інструментів, повторних вимірювань або застосуванням методів найменших квадратів.

Оцінка точності у ГІС також включає аналіз геометричних спотворень, що виникають під час трансформації або геоприв'язки растрових зображень. Важливим критерієм є розподіл похибок: навіть при низькому загальному RMS окремі локальні ділянки можуть мати значні відхилення. Тому у теоретичному аспекті велике значення має співвідношення між кількістю контрольних точок, їхнім просторовим розташуванням та типом математичної моделі, що використовується для трансформації. Нерівномірне розміщення точок або їх недостатня кількість можуть спричинити локальні деформації, які знижують точність моделі. [16]

До критеріїв оцінки точності також відносять аналіз приростів похибок, перевірку відповідності між обчисленими та графічно відображеними об'єктами, топологічний контроль і порівняння результатів різних методів трансформації. У теоретичному підході важливим є принцип незалежної перевірки, за якого точність оцінюють на контрольних точках, що не брали участі у формуванні трансформаційної моделі. Такий підхід підвищує об'єктивність оцінки та дозволяє виявити приховані викривлення.

Таким чином, теоретична основа оцінки точності ґрунтується на комплексному аналізі похибок різної природи, використанні статистичних критеріїв та розумінні взаємодії між методами збору даних, математичними моделями та властивостями просторових об'єктів. Саме на цих принципах базується подальша практична перевірка точності геоприв'язки та вибір оптимальних методів обробки геоданих.

2.3 Експериментальний метод (польові геодезичні вимірювання).

Польовий метод є базовим емпіричним методом геодезичних та геоінформаційних досліджень, що передбачає безпосереднє отримання просторових даних на місцевості шляхом вимірювання координат характерних точок з використанням спеціалізованого геодезичного обладнання. Метою застосування методу у даній роботі було визначення реальних координат опорних точок для подальшої геоприв'язки растрового зображення топографічного плану в середовищі QGIS та оцінки точності різних способів трансформації.

Сутність польового методу полягає у збиранні первинних геодезичних даних безпосередньо в межах досліджуваної території. На відміну від камеральних (аналітичних) методів, які базуються на вже наявних даних або супутникових знімках, польові спостереження забезпечують максимально точні та актуальні координати, що відповідають реальному положенню об'єктів на місцевості. [18]

Основна ідея методу – створити опорну систему координат (локальну геодезичну мережу), в якій можна здійснювати подальшу просторову прив’язку та аналіз даних. У цій роботі польові вимірювання слугували «еталоном» для порівняння точності інших способів геоприв’язки (зокрема за супутниковими знімками).

Польові спостереження проводилися на території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації. Для забезпечення високої точності вимірювань використовувалося електронне тахеометричне обладнання, зокрема тахеометр Sokkia SET-610, віхи для наведення призми, геодезичний біпод, призма-відбивач та штатив для стабілізації приладу.

За основу польових вимірювань були прийняті геодезичні репери, закладені на досліджуваній території, координати яких відомі у системі координат СК-63. Репери слугували базовими пунктами для подальшого визначення координат невідомих точок.

2.4 Метод тріангуляції.

Метод тріангуляції є одним із базових геодезичних методів визначення координат точок місцевості. Він ґрунтується на принципі побудови системи трикутників, у яких вимірюються кути та відстані, що дозволяє обчислити положення нових точок у вибраній системі координат. Цей метод широко застосовується в геодезії, картографії та геоінформаційних дослідженнях, оскільки забезпечує високу точність передачі координат між відомими та невідомими пунктами.

Сутність методу тріангуляції полягає в тому, що координати невідомих точок визначаються через систему кутових і лінійних вимірювань, виконаних між уже відомими точками (реперами). У кожному трикутнику відомою є хоча б одна сторона – базисна лінія, а також виміряні кути при її кінцях. За допомогою тригонометричних співвідношень обчислюються довжини інших сторін і координати нових точок. Таким чином, триангуляція дозволяє поступово

передавати координати від опорних геодезичних пунктів на всю досліджувану територію, створюючи локальну геодезичну мережу. [19, 20]

У межах даної роботи метод тріангуляції застосовувався для визначення координат нових точок (ST1–ST17) у межах трьох полігонів, забезпечення точності польових вимірювань та формування базової опорної геометрії для подальшої геоприв'язки растрового зображення топографічного плану у середовищі QGIS.

Завдяки тріангуляції забезпечено узгодженість координат усіх виміряних точок із наявними реперами, що дозволило виконати геоприв'язку з мінімальними спотвореннями. На практиці це дозволяє визначити координати нової точки за допомогою відомого базису та двох кутів, виміряних тахеометром. Після цього отримані координати можуть бути переведені у потрібну систему координат (у даному випадку – СК-63 на основі еліпсоїда Красовського).

Метод тріангуляції має низку переваг, що визначають його наукову та практичну цінність. Він забезпечує високу точність завдяки використанню кутових вимірювань і коротких базисів, що дозволяє мінімізувати похибки навіть у масштабі 1:500. Оскільки триангуляція не залежить від супутникових сигналів, її можна застосовувати на територіях із поганим прийомом GNSS. Метод також дає змогу створювати локальні координатні системи та внутрішні геодезичні мережі, узгоджені з існуючими реперами. Крім того, точність отриманих даних робить тріангуляцію ефективним базовим етапом для подальшої геоприв'язки та аналітичної обробки матеріалів у ГІС-середовищі. [21]

У структурі дослідження метод тріангуляції виконує об'єднувальну роль між емпіричними (польовими) та аналітичними методами, формуючи еталонну просторову основу, на яку спирається геоприв'язка растрового зображення топографічного плану, аналіз точності трансформацій у QGIS та порівняння результатів із супутниковою прив'язкою.

Тому триангуляція є ключовим методологічним компонентом у процесі інтеграції ГІС, ДЗЗ і GNSS при моніторингу геосистем, оскільки гарантує метричну достовірність і геометричну узгодженість усіх подальших розрахунків.

2.5 Метод геоінформаційного аналізу.

Метод геоінформаційного аналізу є одним із ключових у сучасних дослідженнях геосистем, оскільки забезпечує обробку, аналіз і візуалізацію просторових даних за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). Його сутність полягає у використанні програмних засобів для об'єднання різнотипних геоданих, їх просторової трансформації, геометричної корекції та подальшого аналітичного опрацювання.

У даному дослідженні метод геоінформаційного аналізу було застосовано для прив'язки растрового зображення топографічного плану у середовищі QGIS, оцінки точності трансформації та порівняння результатів прив'язки, виконаної різними способами. Геоінформаційний аналіз базується на принципах просторової інтеграції даних, що дозволяє об'єднати у єдиній координатній системі різні джерела геопросторової інформації – супутникові знімки, топографічні плани, польові вимірювання тощо.

У межах методу геоінформаційного аналізу здійснюється геоприв'язка растрових матеріалів, тобто надання географічних координат кожній точці зображення, а також трансформація координат між різними проекціями. Крім того, проводиться аналіз похибок і спотворень, що виникають після трансформацій, та виконується візуалізація отриманих результатів для оцінки їх відповідності реальній ситуації.

Основою методу є математична модель просторової трансформації, яка описує зв'язок між координатами пікселів растру та їхніми географічними координатами у вибраній системі, а в середовищі QGIS така трансформація реалізується через різні алгоритми – лінійний, афінний, поліноміальний, проективний, тонкостінний сплайн та інші. У межах геоінформаційного аналізу

було виконано геоприв'язку растрового зображення топографічного плану території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації, проведено оцінку точності прив'язки на основі двох наборів контрольних точок – отриманих польовими вимірюваннями та за супутниковими знімками, а також здійснено порівняння результатів трансформацій різних типів, зокрема лінійної, поліноміальної, Гельмерта та проективної, з метою визначення оптимального алгоритму прив'язки для задач крупного масштабу (1:500).

Метод геоінформаційного аналізу має низку переваг, що визначають його наукову та практичну цінність: він забезпечує комплексну обробку даних, дозволяючи поєднувати польові вимірювання, супутникові знімки та растрові карти в єдиному середовищі, а реалізація математичних моделей трансформації гарантує високу точність і мінімальні похибки. Важливою складовою є візуалізація результатів, що підвищує якість аналізу завдяки можливості одночасного перегляду різних типів шарів. Автоматизація обчислень у QGIS дозволяє оперативно розраховувати коефіцієнти трансформації, RMS-похибки та генерувати геопросторові метадані, тоді як гнучкість методу забезпечує відтворюваність і можливість адаптації до інших територій чи масштабів. У загальній структурі дослідження геоінформаційний аналіз виступає центральною ланкою, що поєднує емпіричні польові дані з аналітичним порівнянням результатів, формує єдину систему координат і надає кількісні показники точності, необхідні для подальших геопросторових розрахунків. [22]

2.6 Порівняльний аналіз методів прив'язки.

Порівняльний аналіз методів прив'язки є важливим етапом дослідження, оскільки дозволяє визначити ефективність, надійність і практичну придатність різних підходів до геометричної корекції растрових зображень. У рамках такої оцінки враховуються не лише числові показники похибок, а й характер просторових деформацій, стабільність результатів та відповідність обраних методів вимогам до точності у конкретному масштабі. У контексті геоприв'язки

картографічних матеріалів основним завданням порівняння є встановлення того, наскільки різні джерела координат і різні алгоритми трансформації здатні забезпечити точне суміщення растрового зображення з реальним положенням об'єктів місцевості.

Одним із напрямів порівняння виступає зіставлення прив'язки, виконаної на основі високоточних польових координат, та прив'язки, здійсненої за допомогою супутникових знімків. Польові координати, отримані тахеометричним методом, мають значно вищу метричну точність і забезпечують мінімальну величину похибок під час трансформації. На відміну від них супутникові зображення містять інструментальні, систематичні та проєкційні спотворення, які спричиняють зміщення об'єктів на кілька метрів. Візуальний аналіз таких зображень демонструє, що навіть за правильно виконаної трансформації контури будівель та інші детальні об'єкти не збігаються з їхнім фактичним положенням, що робить супутникову прив'язку неприйнятною для крупномасштабних картографічних робіт. Таким чином, уже на рівні загального порівняння визначається очевидна перевага польових вимірювань як базового джерела геометричної інформації.

Важливим аспектом порівняння є також вплив різних трансформаційних моделей на точність та поведінку растрового шару. Лінійні та афінні перетворення забезпечують задовільну точність у випадках, коли деформації вихідного зображення є рівномірними та незначними. Натомість поліноміальні моделі дають кращі результати у складніших випадках, оскільки здатні компенсувати нерівномірні локальні викривлення, характерні для старих картографічних матеріалів або сканів низької якості. Порівняння похибок для різних моделей показує, що поліноміальні трансформації другого порядку зазвичай є найбільш збалансованими: вони дозволяють досягти низьких значень середньої квадратичної похибки, не утворюючи при цьому надмірних деформацій у периферійних зонах растру, що часто спостерігається при використанні моделей вищого порядку. [23]

Порівняльний аналіз також включає оцінку просторового розподілу похибок, оскільки навіть при схожих числових значеннях RMS різні методи можуть створювати відмінні за характером деформації. У деяких випадках похибки концентруються в окремих секторах зображення, наприклад у кутах або вздовж його меж, що є наслідком нерівномірного розташування контрольних точок або недостатнього їх числа. Інші методи демонструють більш рівномірний розподіл похибок по всій площі, що забезпечує кращу загальну відповідність геометрії. Це підкреслює важливість аналізу не лише середньої похибки, а й просторової структури відхилень.

Загалом результати порівняння засвідчують, що для високоточної геометричної прив'язки растрових планів оптимальним є використання польових координат у поєднанні з поліноміальною трансформацією другого порядку. Такий підхід забезпечує стабільну поведінку трансформаційної моделі, мінімальні похибки та відсутність значущих локальних деформацій. Супутникова прив'язка може застосовуватись лише у випадках, коли до точності не висувається високих вимог – наприклад, для попереднього орієнтування або побудови оглядових карт.

Таким чином, порівняльний аналіз методів прив'язки виконує роль синтезуючого інструменту, що дозволяє комплексно оцінити комбінації джерел даних та математичних моделей. Він забезпечує наукове обґрунтування вибору оптимального підходу до геоприв'язки та визначає практичні рекомендації щодо підвищення точності геоінформаційних робіт.

2.7 Метод логічного узагальнення результатів.

Метод логічного узагальнення результатів застосовується на завершальному етапі наукового дослідження для осмислення, систематизації та інтерпретації отриманих даних. Його мета полягає у тому, щоб, спираючись на результати емпіричних вимірювань, статистичних розрахунків і

геоінформаційного аналізу, зробити обґрунтовані висновки щодо закономірностей, виявлених у процесі дослідження, і сформулювати рекомендації для практичного використання. [24]

У даній роботі метод логічного узагальнення використовувався для інтерпретації числових та графічних результатів, отриманих під час оцінки точності прив'язки растрового зображення у середовищі QGIS. На основі аналізу середніх похибок, порівняння різних типів трансформацій і способів отримання координат було здійснено узагальнення, яке дозволило встановити найоптимальніший метод прив'язки для крупномасштабних геодезичних робіт.

Логічне узагальнення у цій роботі базувалося на послідовному переході від емпіричних фактів до теоретичних висновків. Отримані у польових умовах координати точок, результати трансформацій у QGIS і статистичні показники похибок були співставлені між собою, що дало змогу виявити загальні закономірності – зокрема, залежність точності геоприв'язки від кількості та розташування контрольних точок, а також типу обраної математичної моделі трансформації. Узагальнення цих закономірностей забезпечило можливість сформулювати рекомендації щодо використання поліноміальної трансформації другого порядку як найбільш точної при роботі з планами масштабу 1:500.

Застосування методу логічного узагальнення дозволило не лише підбити підсумки практичних вимірювань, а й виявити причинно-наслідкові зв'язки між якістю вихідних даних, кількістю точок прив'язки та точністю кінцевого результату. Саме завдяки цьому методу було зроблено висновок, що найвищу точність забезпечує використання координат, отриманих тахеометричним методом, тоді як супутникові знімки можуть бути застосовані лише як допоміжний інструмент для орієнтації.

Таким чином, логічне узагальнення стало інтелектуальним підсумком усіх попередніх методів – польового, тріангуляційного, геоінформаційного, статистичного та порівняльного. Воно надало дослідженню цілісності, забезпечило обґрунтованість наукових висновків і дозволило сформулювати

практичні рекомендації, спрямовані на підвищення точності геоприв'язки растрових матеріалів у ГІС-середовищі.

Висновки до розділу 2.

Другий розділ охоплює комплексний аналіз сучасних методів польового знімання, зокрема тахеометричної зйомки, методів визначення координат і технік побудови локальних геодезичних мереж. Показано, що застосування електронного тахеометра Sokkia SET-610, віх, біпода, призми та допоміжного обладнання забезпечує отримання координат із сантиметровою точністю, що є ключовою умовою для геометрично коректної прив'язки топографічних матеріалів крупного масштабу. Було розкрито особливості налаштування обладнання, етапи проведення польових робіт, визначення базисних ліній і роль точного встановлення приладу у формуванні достовірної координатної основи.

Також підкреслено значення методу тріангуляції як основи для побудови локальної опорної мережі та забезпечення узгодженості польових вимірювань. Завдяки використанню трикутних конфігурацій і вимірювання кутів відношення між відомими та новими точками досягається висока геометрична стабільність мережі, що дозволяє передати координати на всю досліджувану територію. Додатково застосовано математико-статистичний аналіз, який забезпечив об'єктивну оцінку точності польових вимірювань та перевірку результатів.

Отже, сучасні електронні прилади в поєднанні з аналітичними методами забезпечують високий рівень точності серед існуючих способів отримання координат. Саме ці дані є еталонними для подальшого порівняння з супутниковими знімками та визначення ефективності методів геоприв'язки в середовищі QGIS у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ III. ОСОБЛИВОСТІ ГЕОПРИВ'ЯЗКИ ТОПОПЛАНУ В СЕРЕДОВИЩІ ГІС НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ РЕЗИДЕНЦІЇ МИТРОПОЛИТІВ БУКОВИНИ ТА ДАЛМАЦІЇ.

3.1. Алгоритм геопросторової прив'язки топографічного плану.

Щоб ефективно оцінити точність прив'язки растрових зображень у середовищі ГІС та забезпечити подальший картографічний і геопросторовий аналіз, було узгоджено послідовний алгоритм виконання дослідження. Спершу проведено польові роботи з визначення координат характерних точок місцевості

за допомогою тахеометра з дотриманням вимог до точності. Далі виконано прив'язку растрового зображення топографічного плану на основі супутникових знімків та координат, отриманих у польових умовах. У середовищі QGIS здійснено аналіз точності прив'язки із застосуванням різних типів трансформацій, після чого проведено порівняння результатів, отриманих під час польових вимірювань, із прив'язкою за супутниковими даними. Завершальним етапом стало порівняння методів прив'язки растрового зображення з метою визначення їх ефективності. [25]

Прив'язка растрових зображень є одним із найважливіших етапів у процесі картографування та аналізу геопросторових даних. Від точності прив'язки залежить можливість ефективного поєднання різнорідних джерел даних, таких як топографічні карти, супутникові знімки та польові вимірювання, для подальшого використання у геоінформаційних системах.

Основною метою прив'язки є встановлення географічних координат для кожної точки зображення, що дозволяє використовувати його як геопросторовий шар. Нами було проаналізовано два методи прив'язки: за допомогою супутникових знімків та точок, отриманих використовуючи тахеометр у польових умовах. Особлива увага приділялась точності кожного методу та їхній придатності для вирішення задач у межах крупного масштабу. Нами було обрано топографічний план (рис. 3.1), масштабу 1:500 із зображеною територією Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації, Чернівецького дендрологічного парку та сейсмологічної станції.



Рис. 3.1 Топографічний план (1:500) Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації.

Безпосередньо перед польовими роботами нами було визначено 3 полігони (рис. 3.2), які охоплюють частину центрального корпусу ЧНУ, дендропарку та сейсмологічну станцію. Також у межах вибраних полігонів є присутні геодезичні репери (рис. 3.3), які використовувались для точної прив'язки та подальшого знаходження визначених контрольних точок.

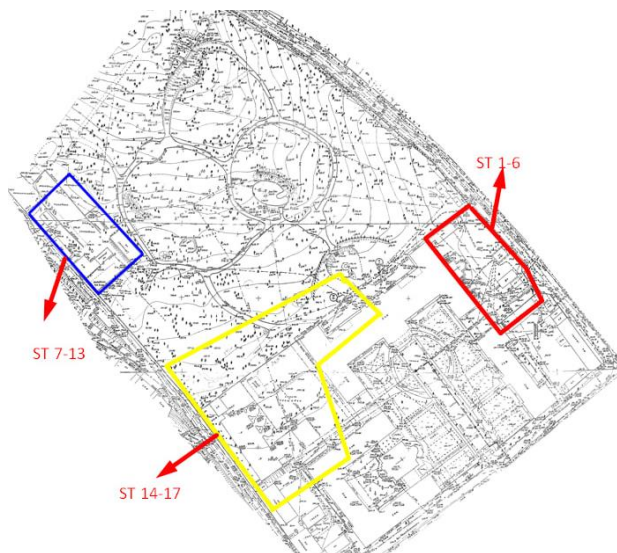


Рис. 3.2 Полігони досліджень та номери точок в їхніх межах.



Рис. 3.3 Геодезичні репери на території дослідження.

В межах кожного полігону обирались точки (рис. 3.4), координати яких потрібно було визначити використовуючи тахеометр для подальшого використання їх в прив'язці растру у програмі QGIS. Для більш точної прив'язки растру були обрані характерні точки місцевості, такі як поодинокі дерева, кути будівель, стовпи, тобто які мають чітко виражені межі та які легко можна буде ідентифікувати на плані, на місцевості та на супутниковому знімку. Мінімальна кількість точок в кожному полігоні становить 4, адже при меншому значенні буде неможливо провести необхідну для нашого дослідження поліноміальну трансформацію.

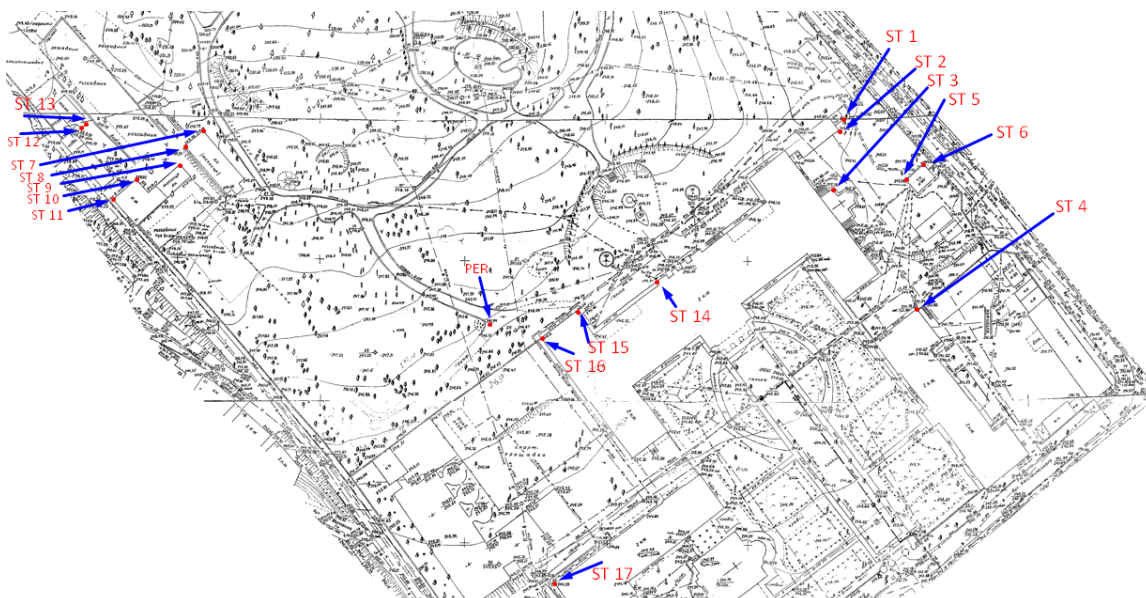


Рис. 3.4 Номер та розташування на плані контрольних точок.

Поліноміальні трансформації 1-3 порядків – одні з найбільш широко поширених, зокрема трансформація 2-го порядку, яка поряд з розтягуванням растру дозволяє і його викривлення. Поліноміальна трансформація 1-го порядку (афінна) зберігає колінеарність (паралельність) і дозволяє робити масштабування, зміщення і поворот вихідного растру. В цілому, чим вищий порядок полінома, тим сильніше відбувається трансформація вихідного растру.

3.2. Підготовка та виконання польового етапу дослідження.

Виконання польової частини роботи потребує матеріально-технічного забезпечення, команди та геодезичну мережу у вигляді реперів, які можна використати базисну лінію. Під час виконання польових робіт використовувалося геодезичне обладнання, зокрема тахеометр Sokkia SET-610, віхи, геодезичний біпод, призма та штатив.

Перш за все, необхідно зібрати команду, як мінімум із двох осіб, оптимальною кількістю буде троє, що є першим і досить вагомим недоліком даного методу прив'язки растру. Одна людина необхідна для встановлення і стабілізації призми на яку наводиться оператор тахеометра, друга для безпосереднього виконання знімання використовуючи тахеометр, а третій член

команди для координації процесу та ведення журналу робіт. Самостійне виконання всіх задач може значно вплинути на точність зібраних даних та збільшує ймовірність здійснення помилки. [26]

За геодезичну основу були взяті наявні на досліджуваній території репери, оскільки вони забезпечують необхідну вихідну точність та слугують надійними фіксованими орієнтирами для подальшого визначення координат вибраних точок і виконання геоприв'язки растрового зображення.

Етапи проведення польових робіт включали вибір дня з ясною та безвітряною погодою для отримання максимально точних результатів, визначення полігону для виконання вимірювань, установку й калібрування обладнання, а також встановлення базисної лінії. Після цього здійснювалося налаштування тахеометра для знімання точок, виконання вимірювань і ведення журналу робіт. Завершальним етапом була перевірка отриманих даних та оцінка коректності виконаних польових процедур.

Для визначення базисної лінії необхідно встановити тахеометр над одним із реперів, та біпод із призмою на іншому, таким чином між тахеометром і біподом буде проходити лінія (базис). Вона використовується як відправна лінія для побудови трикутників у методі тріангуляції чи для визначення координат третьої точки через методи перенесення азимуту або зворотної геодезичної задачі. У нашому випадку базисна лінія проходить між двома точками, координати яких вже відомі, і служить основою для подальших розрахунків або вимірювань.

Налаштування тахеометра є надзвичайно важливим етапом, оскільки навіть незначне відхилення може суттєво вплинути на точність отриманих результатів. Перед початком знімання прилад було центровано над геодезичним репером, після чого виконувалося калібрування відносно горизонтального рівня, спочатку грубе за допомогою круглого рівня, а потім точне на цифровій панелі. Далі в тахеометр вводилися актуальні погодні умови, зокрема температура, тиск, сила вітру та інші параметри, а також задавалась назва файлу у який

записувались результати вимірювань. Завершальним кроком було визначення типу об'єкта, на який здійснюватиметься наведення, у нашому випадку це була призма.

Після успішного налаштування обладнання можна переходити безпосередньо до топографічного знімання. Спершу в прилад вводяться координати геодезичного репера над яким розміщено тахеометр. Далі об'єктив приладу наводиться на призму, встановлену на біподі над іншим репером із відомими координатами, що дозволяє визначити базисну лінію. Після цього проводиться зйомка всіх необхідних для дослідження характерних точок. Координати кожної визначеної точки обов'язково зберігаються як у файлі тахеометра, так і в журналі польових робіт.

Підготовка до польових робіт є ключовим етапом, що визначає точність подальшого топографічного знімання та геоприв'язки растрового зображення. Забезпечення команди, підготовка геодезичного обладнання та використання стаціонарних реперів як вихідної геодезичної основи дозволяють отримати стабільні та надійні вимірювання. Правильне налаштування тахеометра, визначення базисної лінії та чітка організація процесу мінімізують похибки та створюють необхідні умови для ефективного виконання польових робіт і подальшого геопросторового аналізу.

Виконавши всі необхідні умови, зазначені вище, командою було проведення три знімання у полігонах проведення дослідження. Враховуючи, наявність координат реперів у СК-63, системою координат в якій виконувалась зйомка була саме СК-63, яка базується на референц-еліпсоїді Красовського (1940 р.). За потреби, отриманні координати можна перевести у потрібну СК за допомогою QGIS.

Перший полігон знаходиться біля входу у дендропарк, позаду східної частини Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації. Було взято 6 точок, всі вони відповідають кутам будівель. Базисну лінію проведено між геодезичними реперами №7574 та №8056. Незважаючи на те, що точок було обрано 6,

застосувати було можливо лише 4 (ST 3-6), через: а) можливу помилку в зніманні, б) можливу похибку між топографічним планом і місцевістю. Саме тому потрібно завжди обирати додаткові точки, щоб після проведених польових робіт, не потрібно було знову приходити на ту ж локацію і знову налаштовувати весь процес. Опрацьовуючи відзняті точки в QGIS, було помічено, що точки ST 1 та ST 2 вносять значну різницю в прив'язку растру. А саме, прив'язуючи растр на основі точок ST 3 - ST 6 та використовуючи поліноміальний тип трансформації – отримуємо різницю меншу за 1.5 піксель (рис. 3.5). Натомість, коли до вказаних точок додаються ST 1 та ST 2, різниця збільшується і становить від 1.3 до 9.7 пікселів (рис. 3.6), що є неприйнятним.

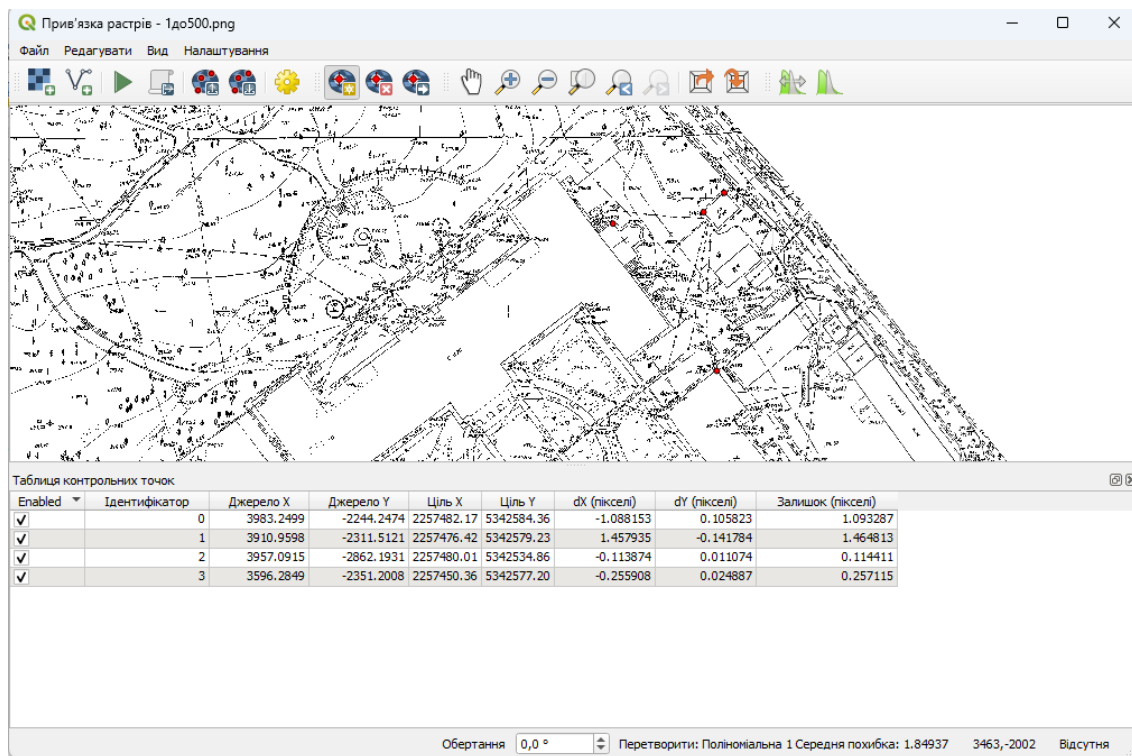


Рис. 3.5 Використання точок ST 3 - ST 6 для прив'язки растру топографічного плану. Різниця в пікселях становить 1.84 п.

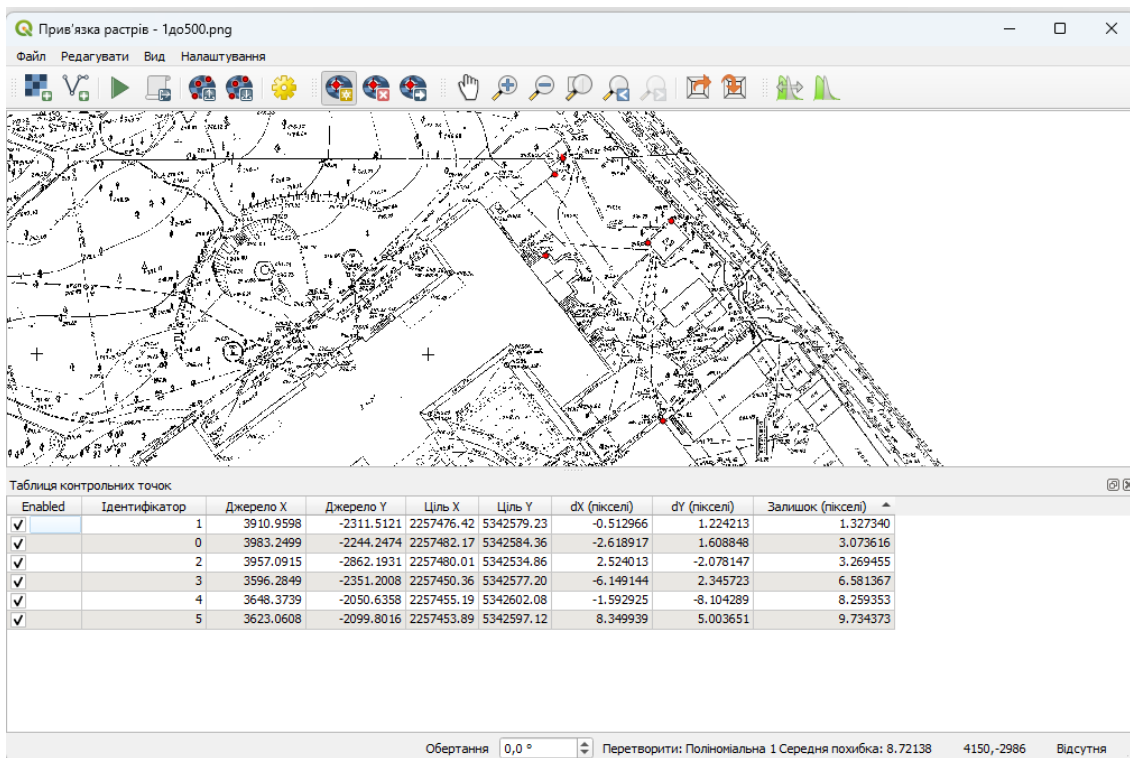


Рис. 3.6 Використання точок ST 1 - ST 6 для прив'язки растру плану місцевості. Різниця в пікселях становить = 8.72 п.

Другим полігоном була обрана локація сейсмологічної станції, враховуючи досвід на попередньому полігоні було обрано також 7 точок – ST 7 - ST 13. Базисну лінію проведено між реперами UNIV та ORG1. У даному випадку проблема із зніманням точок виявилась у тому що не було доступу для встановлення віхи із призмою через ринву, або занадто низькому даху, адже висота віхи навіть у складеному стані становить – 1,5м і не було можливості встановити її поруч із кутом споруди чи теплиці. Різниця в пікселях прив'язки растру використовуючи точки другого полігону становить 2.17 пікселя (рис. 3.7).

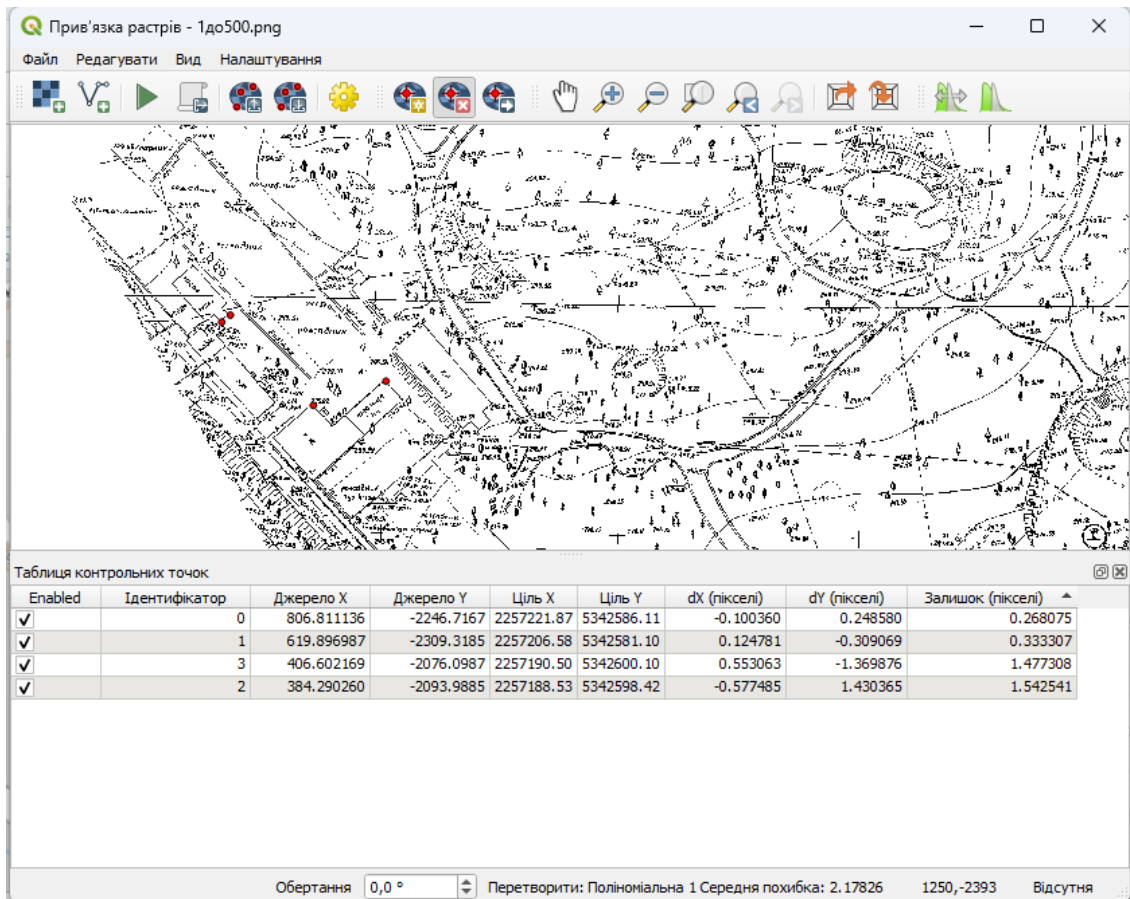


Рис. 3.7 Результат прив'язки растру топографічного плану за точками ST 9 - ST 13, другого полігону.

Територія третього полігону охоплювала північну частину Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації. Також було обрані кути будівель як контрольні точки. Проте у цьому випадку було проведено дві базисні лінії, так як точку ST 14 було неможливо зафіксувати із базису між реперами №7805 та №7589. Для цього було використано допоміжний репер PER, дізнавшись його координати за допомогою базису між №7805 та №7859, було проведено новий базис – №7589 - PER. Відносно нового базису було знайдено координати точок ST 14 - ST 17. Різниця в пікселях після опрацювання даних із тахеометру становить 1.99п (рис. 3.8).

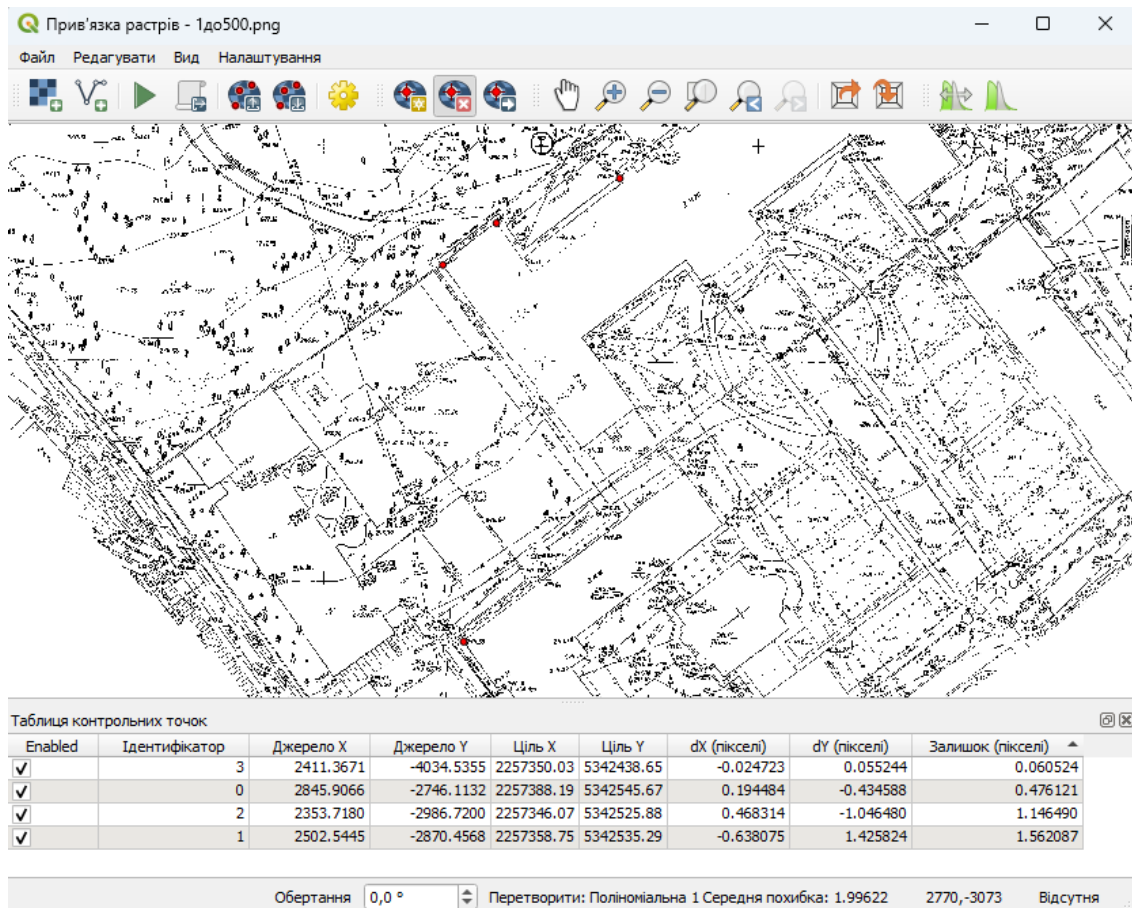


Рис. 3.8 Прив'язка растру топографічного плану за точками ST 14 - ST 17, третього полігону.

Отже, враховуючи отриману різницю в пікселях не вищу ніж 2.2, можемо констатувати, що польові роботи було проведено задовільно. Список контрольних точок та їх координати з файлу, який було експортовано із тахеометра після польових робіт, відображено на рисунку 3.9.

```

00NMISDR33 V04-03.00 Nov-11-24 11:45 111111
10NMFile1.sdr 121111
06NM1.00000000
13NM Version
13000BS
08KI ST1 5342602.081000002257455.18800000245.65700000 22
08KI ST25342597.115000002257453.89400000245.68300000 22
08KI ST35342577.200000002257450.36000000245.98600000 22
08KI ST45342534.857000002257480.01300000244.83700000 22
08KI ST55342579.233000002257476.41500000245.17600000 22
08KI ST5.15342566.317000002257481.84100000245.32100000 22
08KI ST65342584.355000002257482.16600000245.12200000 22
08KI ST6.15342584.330000002257482.23400000245.12100000 22
08KI ST95342586.109000002257221.87400000249.52900000 22
08KI ST105342581.104000002257206.58500000249.16200000 22
08KI ST10.15342581.059000002257206.56500000249.27000000 22
08KI ST125342598.424000002257188.52700000249.74800000 22
08KI ST12.15342598.462000002257188.49600000249.75000000 22
08KI ST135342600.097000002257190.50400000249.80300000 22
08KI ST13.15342600.093000002257190.46400000249.81600000 22
08KI PER15342532.519000002257332.01800000247.02200000 22
08KI ST145342545.667000002257388.19000000246.72200000 22
08KI ST155342535.290000002257358.75400000246.55800000 22
08KI ST165342525.879000002257346.06900000246.58700000 22
08KI ST175342438.652000002257350.02800000246.70600000 22

```

Рис. 3.9 Експортовані з тахеометра контрольні точки дослідження.

На рисунках 3.10, 3.11, 3.12 зображено базисні лінії, напрям знімання кожної точки в межах обраних полігонів та геодезичні репери.

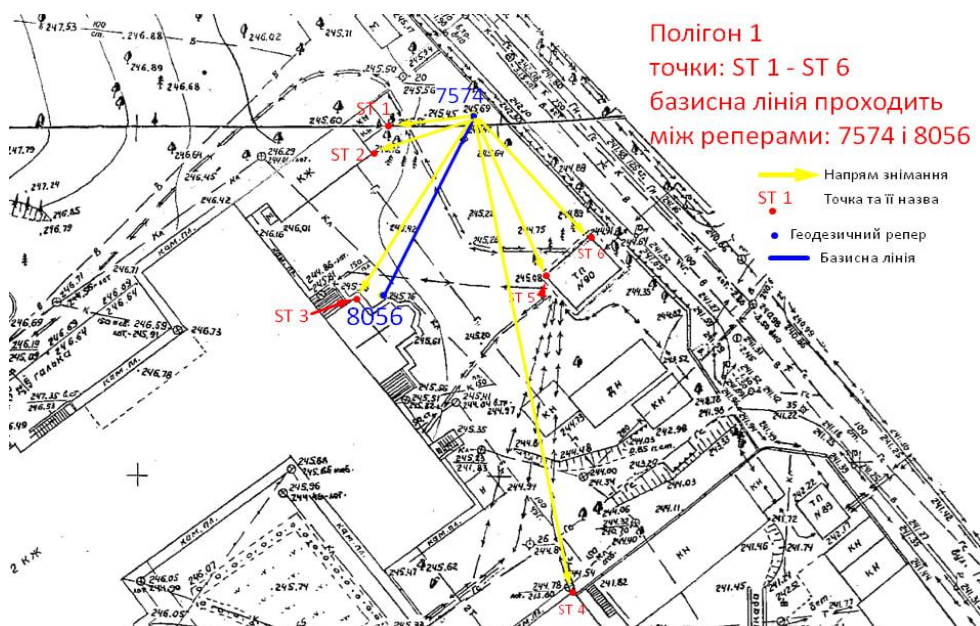


Рис. 3.10 Полігон 1. Точки: ST1 - ST 6.

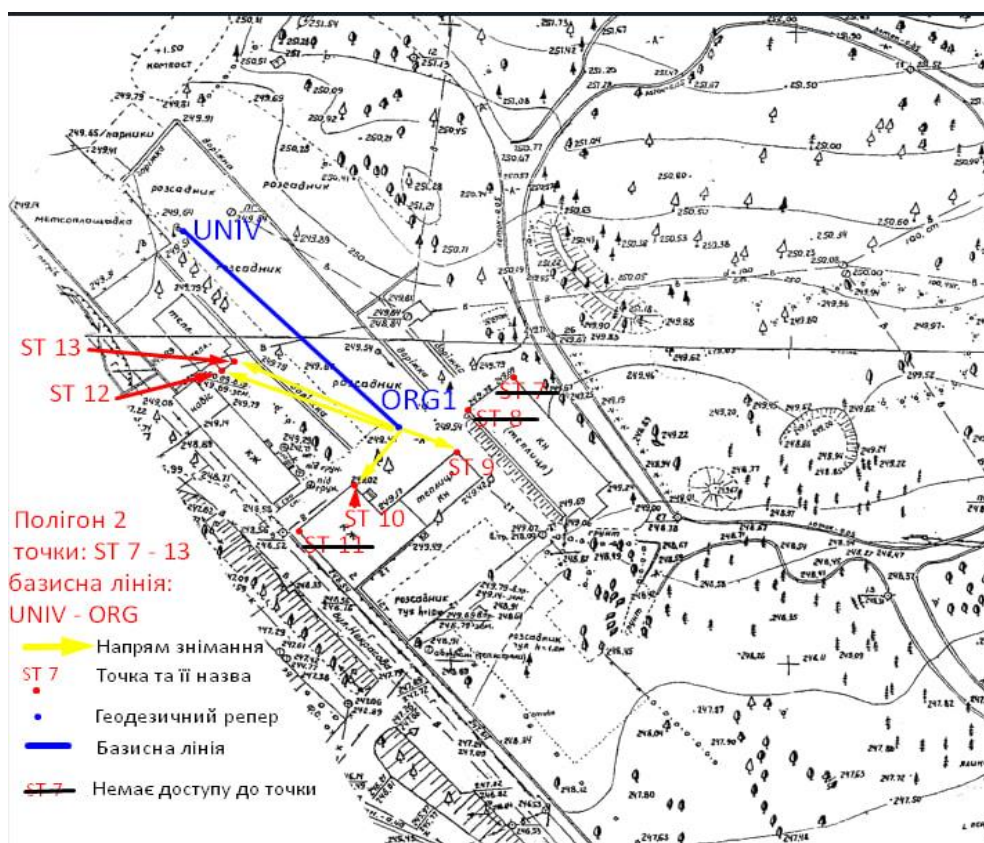


Рис. 3.11 Полігон 2. Точки: ST 7 - ST 13.

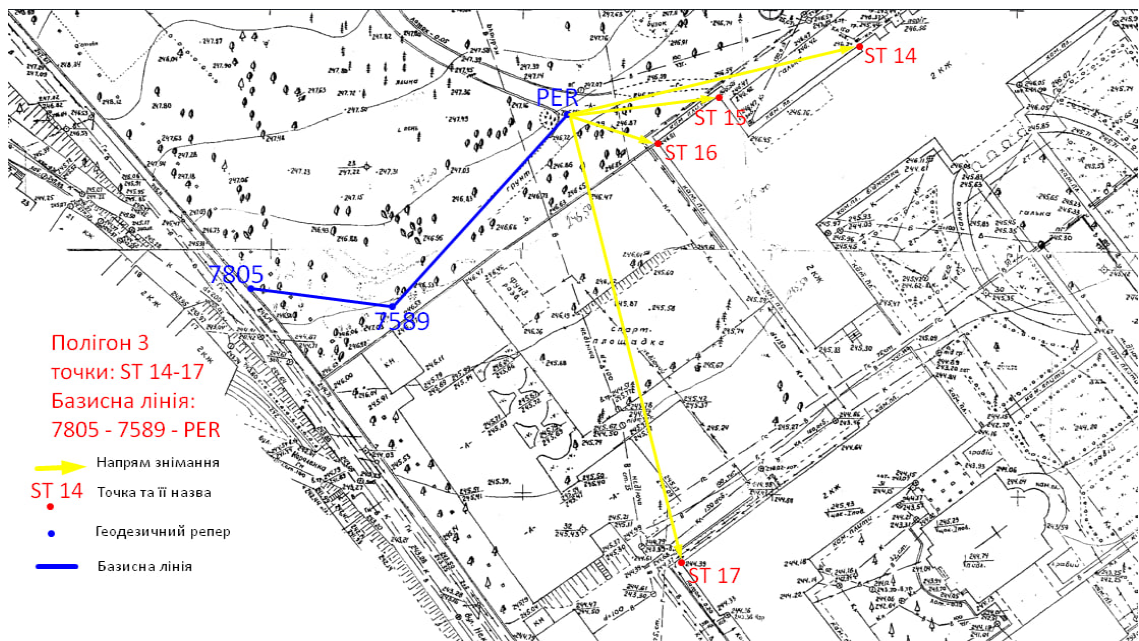


Рис. 3.12 Полігон 3. Точки ST 13 - ST 17.

3.3 Порівняння методів трансформування растру програми QGIS.

Перш ніж здійснювати трансформацію, рекомендується оцінити результативність кожного з методів на основі значень похибки трансформації, яка автоматично розраховується в таблиці точок (окремо для кожної точки і сумарна) у застосунку QGIS: що нижчою є її величина, то вищою є точність виконаної прив'язки. Похибки трансформації прив'язки візуально відображені на кожній точці.

Для здійснення трансформації доступні такі методи:

- лінійна — використовується для генерування файлу географічного реєстрації. Відрізняється від інших алгоритмів, оскільки фактично не трансформує растр. Цей спосіб не підходить для прив'язки сканованих матеріалів;
- Гельмерта — виготовляє прості масштабуючі та поворотні трансформації;
- поліноміальні трансформації 1-3 порядків — одні з найбільш широко поширених, зокрема трансформація 2-го порядку, яка поряд з розтягуванням растру дозволяє і його викривлення. Поліноміальна трансформація 1-го порядку (афінна) зберігає колінеарність (паралельність) і дозволяє робити

масштабування, зміщення і поворот вихідного растру. В цілому, чим вищий порядок полінома, тим сильніше трансформація вихідного растру і більше мінімально необхідних точок прив'язки;

- тонкостінний сплайн (TheThinPlateSpline - TPS) – більш сучасний метод трансформації, що дозволяє здійснювати локальні трансформації даних з метою «підігнати» їх під точки прив'язки (аналог методу «гумового листа»). Цей алгоритм добре зарекомендував себе при прив'язці вихідних матеріалів низької якості;

- проективна трансформація – лінійне обертання та зміщення географічних координат. [26]

Збільшення кількості контрольних точок потенційно підвищує точність геоприв'язки, однак кожна додаткова точка одночасно формує власну складову у структурі, що може впливати на загальний результат трансформації. В таблиці 3.1 представлена різниця розташування пікселів, при використанні 4, 8 та 12 точок та різних типів трансформації:

Таблиця 3.1

Різниця в пікселях при різних методах трансформації

Кількість точок	Тип трансформації	Різниця в пікселях
4	Лінійна	6.5
	Гельмерта	5.75
	Поліноміальна 1	1.99
8	Лінійна	22.91
	Гельмерта	18.63
	Поліноміальна 1	14.33
	Поліноміальна 2	1.34
12	Лінійна	20.61

Кількість точок	Тип трансформації	Різниця в пікселях
4	Лінійна	6.5
	Гельмерта	5.75
	Поліноміальна 1	1.99
	Гельмерта	17.24
	Поліноміальна 1	12.40
	Поліноміальна 2	4.62
	Поліноміальна 3	2.97
	Проективний	6.62

Отже, враховуючи дані таблиці, для відзнятих точок та прив'язки по ним растрового зображення топографічного плану території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації буде використовуватись 8 точок та поліноміальний 2 тип трансформації як найкращий варіант серед можливих. Відносно прив'язаного растру за параметрами представленими на рисунку 3.13, будуть проведені подальші розрахунки та дослідження у програмі QGIS.

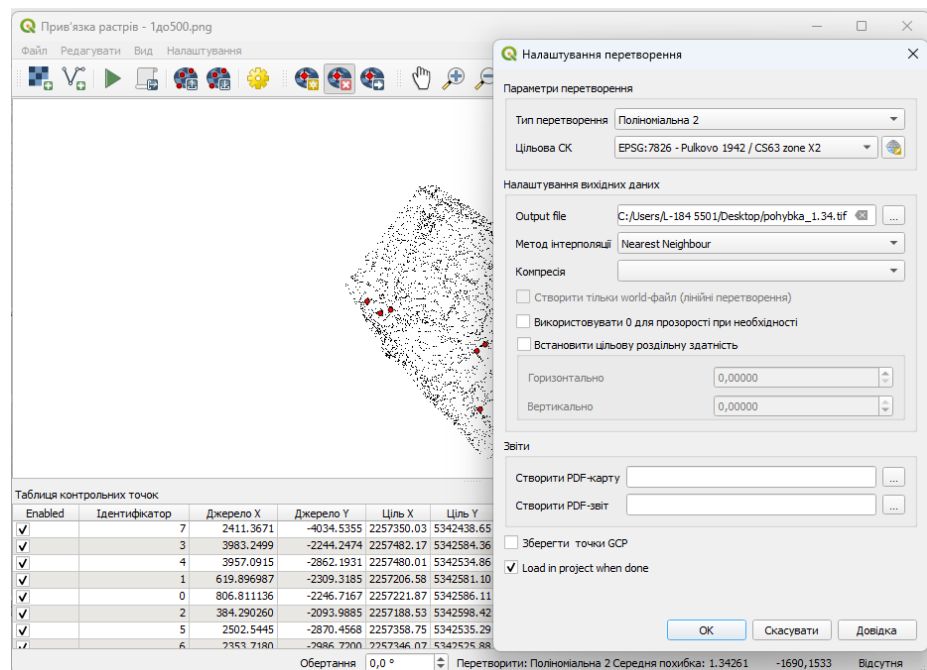


Рис. 3.13 Налаштування перетворення растрового зображення топографічного плану території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації у QGIS.

3.4 Аналіз точності прив'язки растру на основі даних, отриманих у ході польових робіт.

Точність прив'язки растрового зображення залежить від кількості та рівномірного розміщення контрольних точок. Якщо умовно поділити растрове зображення на 5 частин – лівий-нижній, лівий-верхній, правий-верхній, правий-нижній кути та центр, то в залежності від того де ми поставимо більше точок, там і буде менше спотворення. Наприклад, якби ми прив'язали наш топографічний план лише за точками з першого полігону, ми б отримали незначну різницю в пікселях у правому-нижньому куті зображення проте велику похибку в протилежному (рис. 3.14).

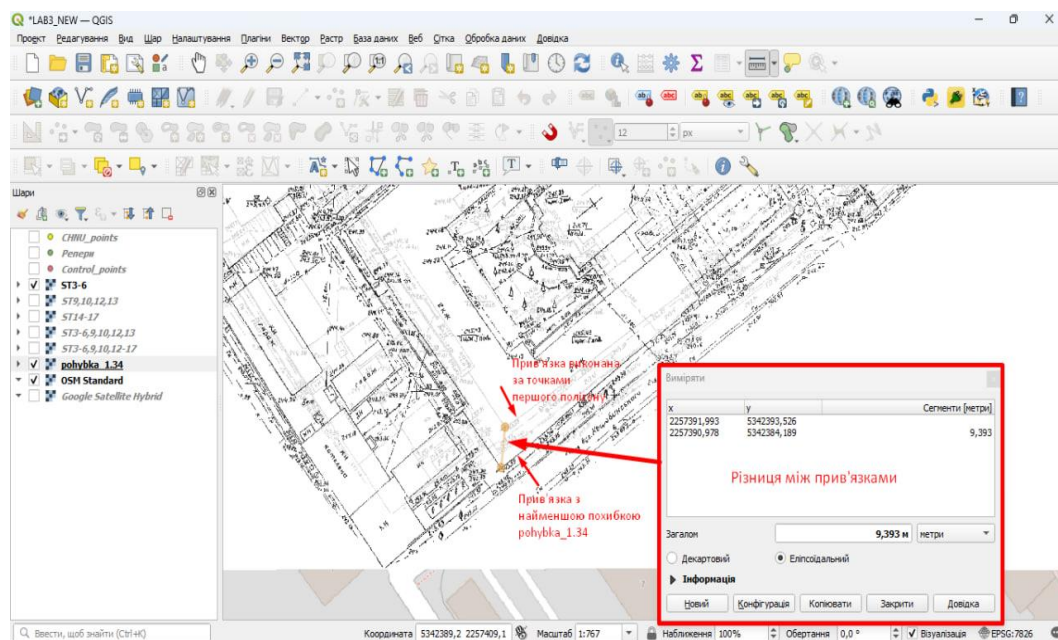


Рис. 3.14 Приклад чому прив'язка лише по одному полігону була б неефективною.

Також різницю між прив'язками використовуючи точки з різних полігонів можна прослідкувати за допомогою реперів, які не змінюють свого положення. При використанні різних точок, растрове зображення топографічного плану буде по різному деформуватись і змінювати своє положення відносно інших об'єктів, що не належать до растру. Так, на рисунках 3.15 та 3.16 можна прослідкувати, що

геодезичні репери знаходяться у різних місцях топографічного плану через особливість трансформації.

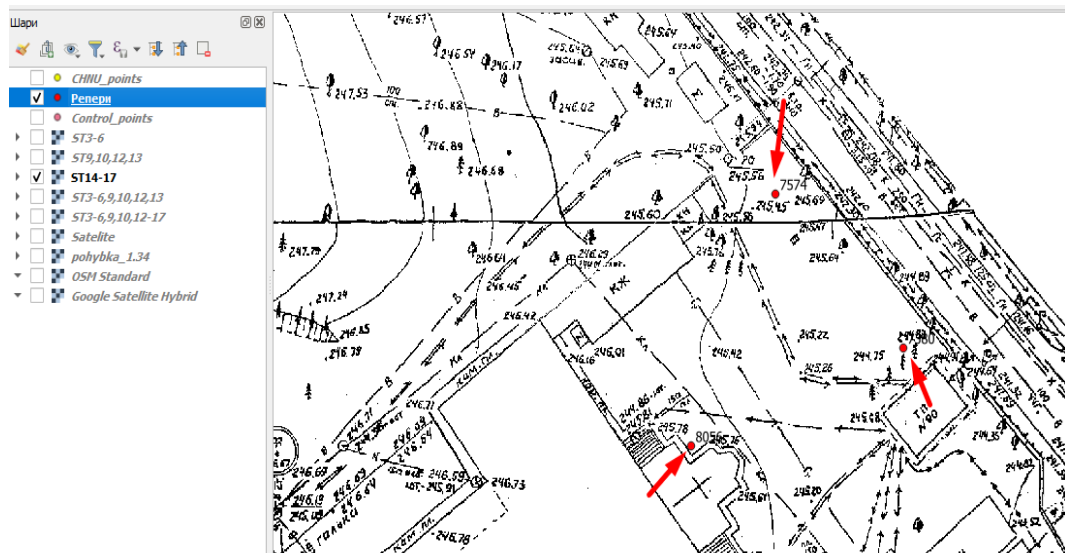


Рис. 3.15 Прив'язаний растр лише по точкам ST14-17 та розташування реперів (червоні точки) на плані.

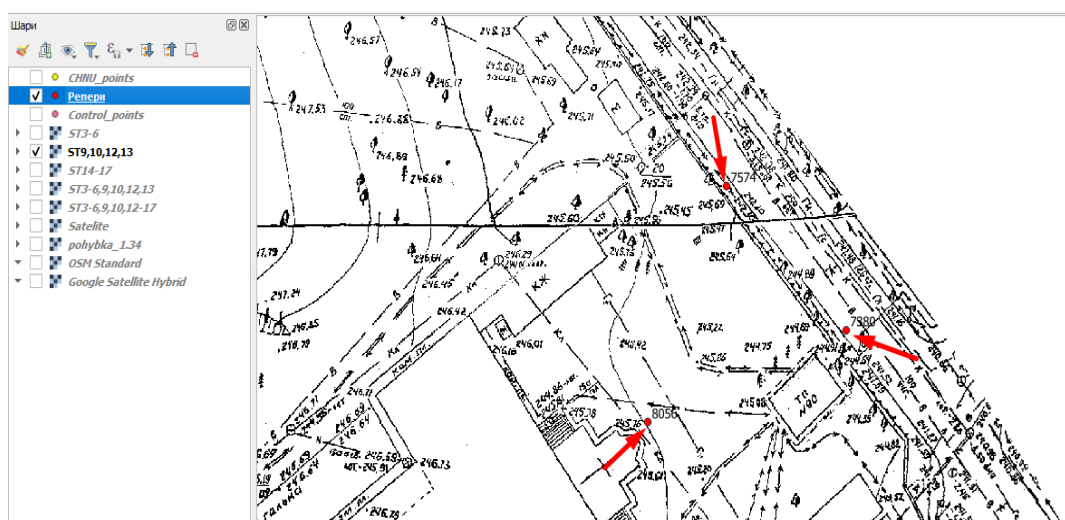


Рис. 3.16 Прив'язаний растр лише по точкам ST9-13 та розташування реперів (червоні точки) на плані.

Отже, передусім необхідно встановити, чи потребує подальшого опрацювання весь растр, чи лише окремі його фрагменти. Наприклад, нам потрібно прив'язати і надалі працювати лише з будівлею Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації. У такому випадку достатньо буде у польових умовах, за допомогою тахеометра встановити координати характерних точок будівлі та прив'язати растр за отриманими точками. Подальші деформації

расту, які будуть відбуватись за межами периметру точок, неважливі адже та частина не відіграє ніякої ролі в дослідженні (рис. 3.17 та 3.18).

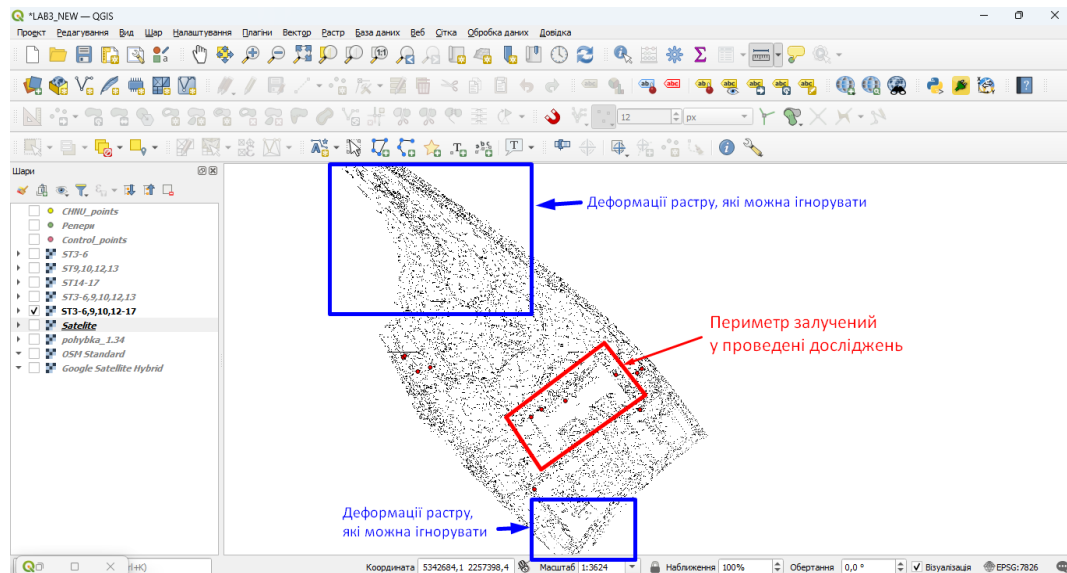


Рис. 3.17 При певних умовах, деформації растру можна ігнорувати.

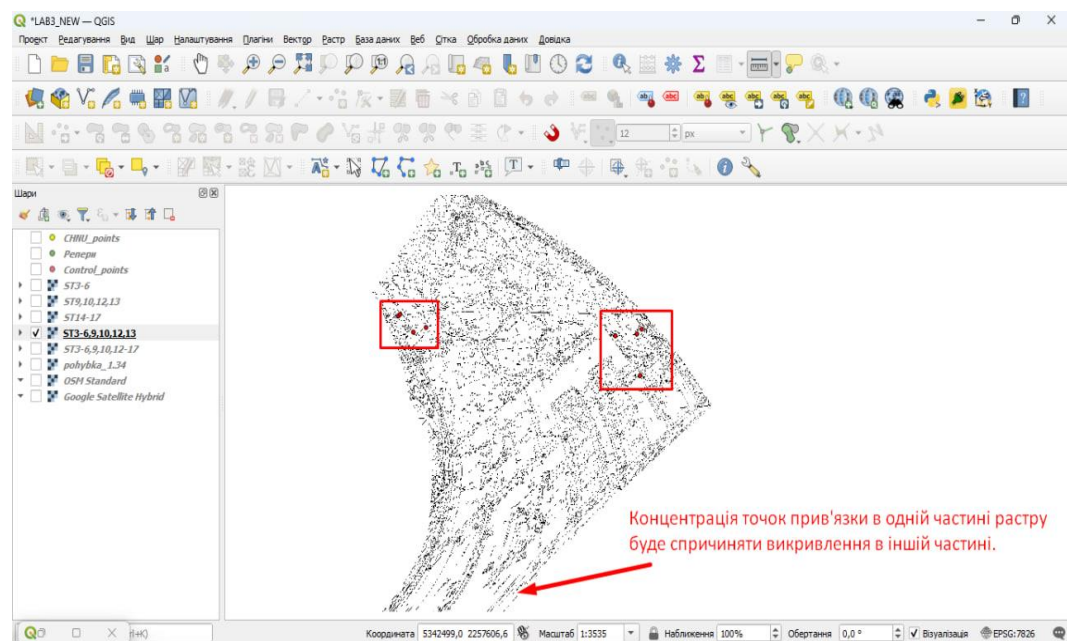


Рис. 3.18 Концентрація точок прив'язки в одній частині, буде спричиняти викривлення зображення в іншій.

Для кращого розуміння розглянемо умовний приклад: маємо растрове зображення карти України, а об'єкт дослідження розташований у межах Чернівецької області – м.Чернівці. Під час прив'язки такого растру в QGIS достатньо використовувати точки, розташовані по периметру зазначеної області.

Території за межами цього периметру можуть зазнавати помітних деформацій у процесі трансформації, однак це не впливає на якість дослідження, оскільки цільова ділянка знаходиться всередині периметру, де спотворення будуть мінімальними або практично відсутніми.

Тож, для роботи зі східною частиною Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації (точки ST 5-6), яка знаходиться в межах полігону №1, прив'язка виконана точками з полігону №1 буде найточнішою. Проте якщо завдання стоїть у прив'язці всього расту – необхідно розподілити точки якомога рівномірніше. Тому було обрано три полігони та проаналізовано відмінності між результатами прив'язки, виконаної окремо для кожного полігону за його власними опорними точками, а також прив'язки, здійсненої на основі об'єднаної множини всіх точок. Найкращим варіантом із найменшою похибкою виявились об'єднані точки з поліноміальним 2 типом трансформації (рис. 3.19). Відносно нього й було проведено розрахунки відхилення інших прив'язок, результат яких наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Різниці у відстанях між прив'язками.

Еталонна прив'язка	Порівнювальна прив'язка	Сектор растру та різниця, м					Середня різниця
		Лівий нижній	Лівий верхній	Правий верхній	Правий нижній	Центр	
Поліном 2 Розв'язка_1.34	Полігон 1 (ST 3-6)	9,39	13,09	9,67	1,16	1,89	7,04
	Полігон 2 (ST 9, 10, 12, 13)	13,22	0,67	4,1	14,4	8,48	8,174
	Полігон 3 (ST 14 - 17)	1,54	12,47	10,36	2,62	1,46	5,69
	Всі полігони	10,47	4,71	12,22	4,11	2	6,702
	Прив'язка	11,3	9,04	18,49	5,16	5,94	9,986

	супутниковому знімку						
--	----------------------	--	--	--	--	--	--

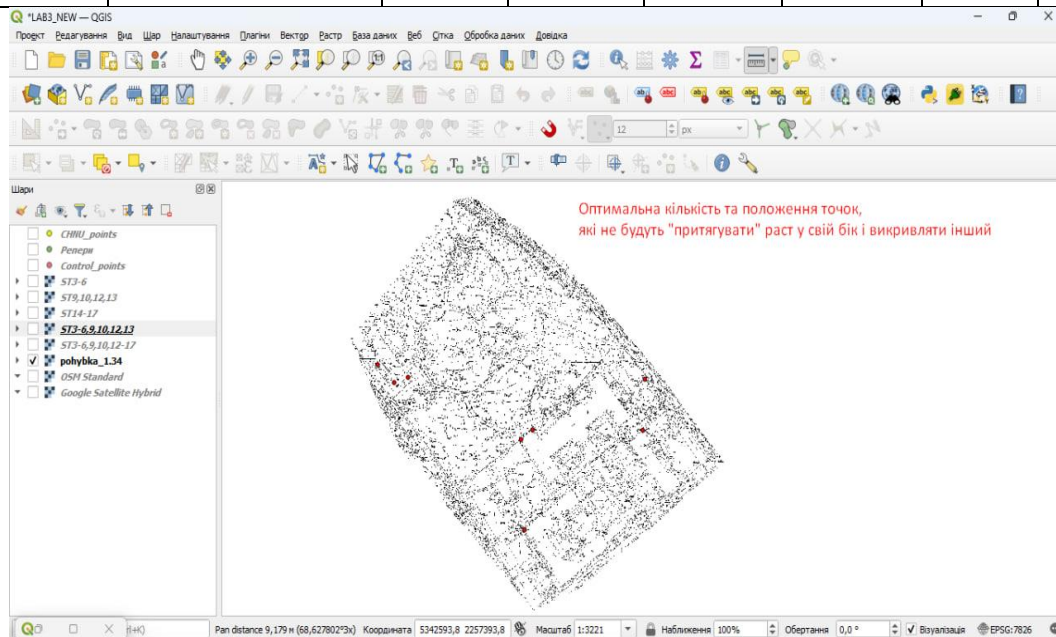


Рис. 3.19 Варіант прив'язки із найменшою похибкою та деформацією растру.

Отримані дані з таблиці вище, вказують на те, наскільки може бути різниця в точності прив'язки у різних місцях растру. Для полігону 1, який розташований у лівій-нижній частині будуть найменш характерні зміни у правому-нижньому куті = 1,16м, а у протилежному куті становить аж 13,09м. Відповідно, правому-верхньому куті деформації будуть більшими приблизно в 11 разів ніж у найменш спотвореному секторі. За аналогією для полігону 2 в 21 раз, для полігону 3 в 8 разів, для прив'язки за всіма точками в 6 разів.

Отже, чим ближче об'єкт на растровому зображенні знаходиться до точок прив'язки тим менше він буде спотворений.

3.5 Порівняння точності прив'язки по супутниковому знімку та отриманих в результаті дослідження даних.

Додатково було виконано прив'язку растрового зображення топографічного плану території Резиденції Митрополитів Буковини та Далмації використовуючи супутникові знімки Google Satellite Hybrid безпосередньо у програмі QGIS. З

першого погляду може здатись, що прив'язка працює досить точно, різниця розташування 4.3 пікселів, що не є критичним, лінії об'єктів на плані збігаються із об'єктами на знімку (рис. 3.20).

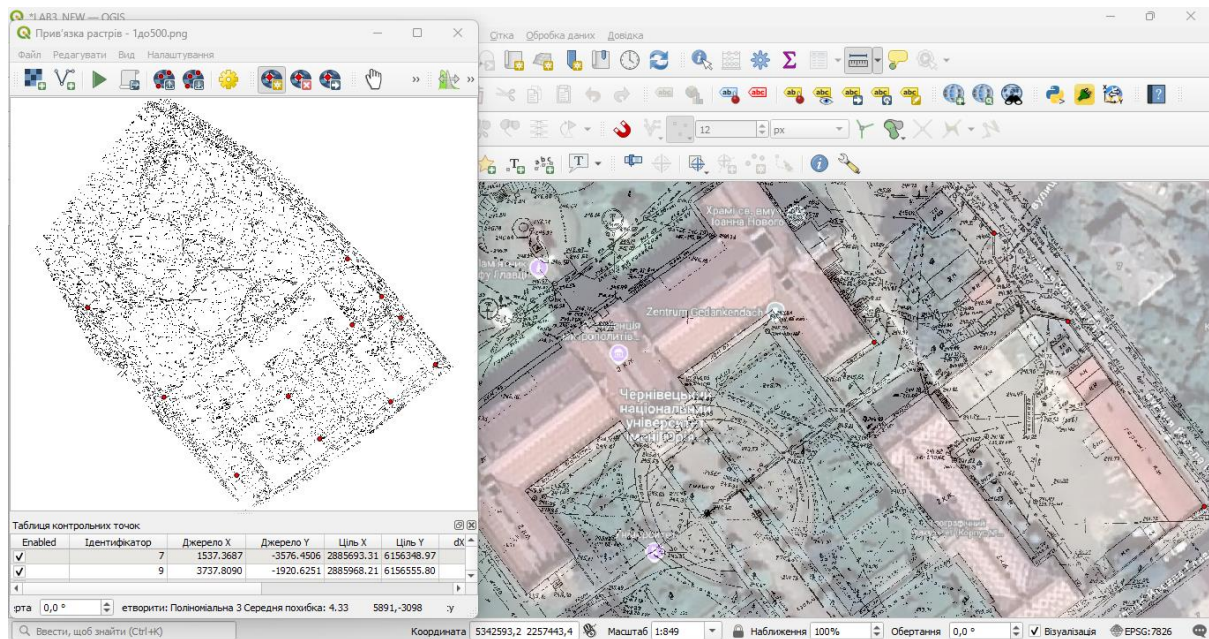


Рис. 3.20 Прив'язка топографічного плану за характерними точками використовуючи супутниковий знімок.

Проте при порівнянні супутникового знімку і отриманих в ході польових робіт характерних точок, з'ясовується, що об'єкти на супутниковому знімку на 7-10 метри знаходяться далі від їхнього істинного розташування (рис. 3.21). Тобто, топографічний план був прив'язаний по неточним координатам відхиленнями від справжнього розташування на 1-3 метри, що у свою чергу дає таку велику різницю при порівнянні еталонної прив'язки і прив'язки за допомогою супутникового знімку. У деяких випадках різниця сягає 20 метрів, що є неприпустимим для роботи з таким крупним масштабом.

Однак детальніший аналіз показав, що така відповідність є лише зовнішньою. Порівняння супутникового знімка з координатами характерних точок, визначених за результатами польових тахеометричних вимірювань, продемонструвало зміщення об'єктів на супутниковому зображенні на 1-3 м відносно їхнього фактичного розташування (рис. 3.21). У деяких локальних зонах різниця сягала навіть 10м, що є абсолютно неприпустимим для робіт у

масштабі 1:500, де допустимі відхилення вимірюється сантиметрами, а не метрами.

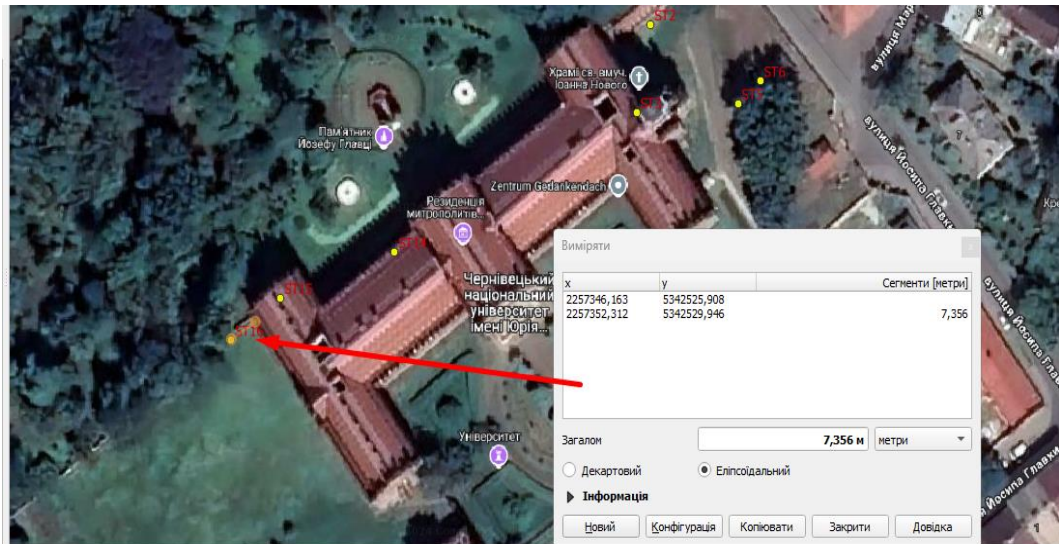


Рис. 3.21 Різниця між розташуванням об'єкта на супутниковому знімку і фактичним місцезнаходженням.

Причини такої неточності пояснюються специфікою формування супутникових знімків. Карти Google, Bing чи ESRI не призначені для високоточного геодезичного використання, оскільки їх точність залежить від автоматизованих процесів орторектифікації, характеристик сенсорів, похибок GPS-навігації літальних апаратів, моделі рельєфу, а також від технічних спотворень, що виникають під час створення мозаїк. Додатковим фактором є те, що провайдери не надають інформації щодо реального зміщення, а точність може суттєво змінюватися залежно від території.

Порівняння RMS-показників також підтвердило значну перевагу польових вимірювань. Якщо прив'язка за координатами, отриманими тахеометром, демонструє мінімальні відхилення, допустимі для масштабу 1:500, то прив'язка за супутниковими даними формує помилки у діапазоні від 1 до 10 метрів, що у десятки разів перевищує нормативи. Це призводить до некоректного положення об'єктів, викривлення меж, неточності при проектуванні інженерних мереж, хибного визначення площ та відстаней, а також загального накопичення похибок у подальших ГІС-операціях.

Таким чином, хоча супутникові знімки можуть використовуватися як допоміжний орієнтовний шар для візуалізації, вони не є надійним джерелом координат для геоприв'язки матеріалів крупного масштабу. Єдиним методом, що забезпечує необхідну точність для масштабу 1:500, залишається використання координат, отриманих у результаті польових геодезичних вимірювань.

Висновки до розділу 3.

У третьому розділі представлено практичну реалізацію процесу геоприв'язки растрового топографічного плану з використанням координат отриманих у результаті польових робіт та супутникових даних у середовищі QGIS. Проведено порівняння ефективності різних трансформаційних моделей та варіантів розташування контрольних точок, що дозволило визначити найбільш точний і стабільний підхід до прив'язки растру. Встановлено, що оптимальним методом для растрових матеріалів масштабу 1:500 є поліноміальна трансформація другого порядку із використанням рівномірно розміщених точок, отриманих у ході тахеометричної зйомки.

Аналіз показав, що прив'язка за польовими вимірюваннями забезпечує мінімальні деформації у межах 1,3–2 пікселів і високий рівень просторової відповідності растрового плану об'єктам на місцевості. Навпаки, прив'язка за супутниковими знімками продемонструвала значні відхилення: локальні зміщення становлять від 1 до 10 метрів, а в окремих секторах до 20 метрів, що у десятки разів перевищує допустимі норми. Тому супутникові дані не є придатними для високоточної геоприв'язки, хоча можуть використовуватися як допоміжний шар для орієнтування та візуалізації.

Отже, практичний аналіз довів, що надійність геоприв'язки визначається точністю вихідних координат, рівномірністю розподілу контрольних точок та коректним обранням математичної моделі трансформації. Лише використання

високоточних польових вимірювань здатне забезпечити необхідну достовірність для картографічних проектів масштабу 1:500.

ВИСНОВКИ

Прив'язка растрових зображень є ключовим етапом у геодезичних і картографічних роботах, оскільки від її точності залежить коректність подальших розрахунків і аналізу. У даній роботі було порівняно два підходи: прив'язка за допомогою супутникового знімка та використання даних, отриманих тахеометром у польових умовах.

Використання супутникового знімка характеризується своєю простотою та доступністю, адже дає змогу швидко отримати початкову геоприв'язку. У більшості випадків лінії об'єктів на топографічному плані візуально збігаються з об'єктами на супутниковому зображенні, а також існує можливість інтеграції інструментів штучного інтелекту для підвищення точності прив'язки. Проте такий підхід має суттєві недоліки: об'єкти на супутникових знімках можуть відхилятися від свого фактичного розташування на 7-10 метрів, що у випадку крупних масштабів (1:500) є неприйнятним для геодезичних і картографічних робіт.

Натомість прив'язка за точками, отриманих у ході тахеометричної зйомки, має перевагу високої точності, яка забезпечується використанням геодезичних реперів та сучасного обладнання. При застосуванні поліноміальної трансформації другого порядку похибка може становити до 2 пікселів, що відповідає вимогам крупномасштабного картографування. Крім того, такий метод дозволяє досягти високої деталізації та забезпечує можливість локального підлаштування зображення. Водночас його недоліками є необхідність значного матеріально-технічного забезпечення – тахеометра, біпода, віхи та іншого обладнання. Метод також є трудомістким, оскільки потребує команди з декількох осіб і повного циклу польових робіт. Використання інструментів штучного інтелекту в цьому випадку обмежене переважно заключними етапами, адже збір опорних точок та основна частина вимірювань не підлягають автоматизації.

Підсумовуючи переваги та недоліки обох методів, можемо констатувати, що прив'язка супутникового знімка є швидким методом, але не забезпечує потрібної точності для детальних геодезичних задач. Прив'язка за точками з польових робіт є трудомісткою, але забезпечує високу точність та можливість використовувати отримані результати для аналізу і моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Світличний О. О., Плотницький С. В. Основи геоінформатики : навч. посіб. / під ред. Світличного О. О. Суми : Університетська книга, 2006. 295 с.
2. Павленко Л. А. Геоінформаційні системи : навч. посіб. Харків : Вид. ХНЕУ, 2013. 260 с.
3. Калинич І. В., Радиш І. П., Ваш Я. І. Електронні геодезичні прилади : конспект лекцій. Ужгород : Видавництво УжНУ «Говерла», 2021. 156 с.
4. Мосов С. П., Тарасов В. М., Чорнокнижний О. А., Куковський С. А., Брезіцький Е. Ю. Географічні інформаційні системи : підручник. К. : НАОУ, 2005. 240 с.
5. Самойленко В. М. Основи геоінформаційних систем. Методологія : навч. посіб. К. : Ніка-Центр, 2003. 276 с.
6. Іщук О. О., Коржнев М. М., Кошляков О. Е. Просторовий аналіз і моделювання в ГІС : навч. посібник / за ред. акад. Д. М. Гродзинського. К. : ВПЦ "Київський університет", 2003. 200 с.
7. Скрипник Я. П. Основи геоінформаційних технологій : методичні вказівки та завдання до практичних і лабораторних робіт. Чернівці : Рута, 2004. 44 с.
8. Principles of Geographic Information Systems / R. A. de By (ed.). 2nd ed. Enschede, The Netherlands, 2001. [Electronic resource]. – Access mode: https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesgis.pdf
9. Бачишин Б. Д. Інженерна геодезія : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2020. 196 с.
10. Уроки та поради з QGIS [Електронний ресурс]. – Access mode: <http://www.qgistutorials.com/uk/>
11. Toaca A., Vasilca D. Analysis of different map georeferencing methods in GIS // REVCAD – Journal of Geomatics and Environmental Engineering. – 2017. – Vol. 14, №2. – P. 141–150.
12. Островський А. Л., Мороз О. І., Тарнавський В. Л. Геодезія : підручник. Ч. 2. Львів : Вид-во нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2007.
13. Сухий П. О., Сабадаш В. І., Дарчук К. В. Сучасні електронні геодезичні прилади: практикум. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 288 с.
14. Літинський В. П., та ін. Перевірка та підготовка до роботи електронного тахеометра SOKKIA SET 610, SET 610 К. Ч. II. Геодезія : методичні рекомендації. Львів, 2010.

15. Welcome to SOKKIA-EUROPE! [Електронний ресурс]. – Access mode: <http://www.sokkia.net/eu-index.html>
16. Казаченко Т., Пархоменко Г., Молочко А. Картографічне моделювання : навч. посіб. / під ред. А. Золовського. Вінниця : Антекс-У ЛТД, 1999. 328 с.
17. GIS Dictionary [Електронний ресурс]. – Access mode: <https://support.esri.com/en/otherresources/gis-dictionary>
18. Kavanagh B.F., Glenn Bird S.J. Surveying: Principles and Applications. – 9th ed. – Boston : Pearson Education, 2014. – 784 p.
19. Янкін О. Є., Трегуб Ю. Є., Бруй Г. В. Супутникова геодезія та сучасні геодезичні технології. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. 74 с.
20. James M.R., Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 95. – P.
21. Шипулін В. Д. Основні принципи геоінформаційних систем /В. Д. Шипулін. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 312 с.
22. Гуцул Т.В. Практикум з основ ГІС та геоінформаційного картографування : Навчально-методичний посібник / Т.В. Гуцул, Я.П. Скрипник. – Чернівці: ЧНУ, 2014. – 171 с.
23. Uyo A.E. Positional accuracy assessment of historical Google Earth imagery in Lagos State, Nigeria // Applied Geomatics. – 2022. – Vol. 14, №3. – P. 293–308. – DOI:10.1007/s12518-022-00449-9.
24. Wallace L., Lucieer A., Malenovsky Z., et al. Assessment of forest structure using two UAV techniques: airborne laser scanning and structure from motion // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, №2. – P. 1–23. – DOI:10.3390/rs8020128.
25. Schofield W., Breach M. Engineering Surveying. – 7th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. – 640 p.
26. Мельник А.А., Дарчук К.В., Сабадаш В.І. ГІС-технології в інженерно-геодезичному проєктуванні: Навчальний посібник : Чернівці : Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, 2024. 152 с.
27. QGIS Development Team. QGIS User Guide [Electronic resource]. – 2024. – Mode of access: <https://docs.qgis.org> (date of access: 02.12.2025).
28. Snyder J.P. Map Projections – A Working Manual. – Washington : U.S. Geological Survey, 1987. – 383 p.
29. GDAL/OGR Contributors. GDAL Documentation [Electronic resource]. – 2024. – Mode of access: <https://gdal.org>

30. Geographic information – Data quality. – Geneva : International Organization for Standardization, 2013. – 146 p.