

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Матішин Софія  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**  
**«Порівняльний аналіз точності GNSS RTK та тахеометричного  
знімання при моніторингу змін землекористування»**

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

*С. Матішин, студентка групи ГЗ-21-1*

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

**Науковий керівник:** *ст. викладач Андрій Матішук*  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

*проф. Микола ПРИХОДЬКО*

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

*(повне найменування вищого навчального закладу)*

**Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА**

**Кафедра геодезії та землеустрою**

**Освітній рівень бакалавр**

**Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій**

*(шифр і назва)*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри геодезії та землеустрою**

**проф. Микола ПРИХОДЬКО**

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

**Матішин Софії**

*(прізвище, ім'я, по батькові)*

**1. Тема роботи: «Порівняльний аналіз точності GNSS RTK та тахеометричного знімання при моніторингу змін землекористування»**

**керівник роботи: ст. викладач Андрій Матішук**

*(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)*

затверджена наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ року**

**3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):**

1. Теоретичні основи застосування GNSS RTK та тахеометричного знімання у геодезичних та землепорядних роботах
2. Організація та виконання польових робіт для моніторингу змін землекористування
3. Інтеграція RTK та тахеометра для землепорядного знімання

**5. Перелік графічного матеріалу:**

**6. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_**

## 7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	1. Теоретичні основи застосування GNSS RTK та тахеометричного знімання у геодезичних та землевпорядних роботах		
2	2. Організація та виконання польових робіт для моніторингу змін землекористування		
3	3. Інтеграція RTK та тахеометра для землевпорядного знімання		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

\_\_\_\_\_ ***Матійшин С.***  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ ***Матішук А.***

# Зміст

## Вступ

### **1. Теоретичні основи застосування GNSS RTK та тахеометричного знімання у геодезичних та землепорядних роботах**

- 1.1. Сучасні технології геодезичних вимірювань: загальний огляд
- 1.2. Суть та принцип роботи GNSS RTK
- 1.3. Принципи роботи тахеометра та сфери його застосування
- 1.4. Порівняльна характеристика GNSS RTK та тахеометричного знімання
- 1.5. Практичне значення вибору методу в землепорядних роботах

### **2. Організація та виконання польових робіт для моніторингу змін землекористування**

- 2.1. Вибір ділянки дослідження та обґрунтування методики
- 2.2. Виконання знімання методом GNSS RTK
- 2.3. Виконання знімання електронним тахеометром
- 2.4. Методика оцінки точності результатів
- 2.5 Статистичний аналіз результатів

### **3. Інтеграція RTK та тахеометра для землепорядного знімання**

- 3.1 Аналіз стилів зміни землекористування
- 3.2 Аналіз зміни стилю землекористування міської території
- 3.3 Землепорядні роботи із застосуванням GNSS RTK та тахеометра після аналізу змін у землекористуванні
- 3.4 Порівняння ефективності землемірних досліджень у міських районах з використанням RTK або тахеометричної зйомки

## Висновок

## Список використаних джерел

## Анотація

У цій бакалаврській роботі проведено зіставний аналіз точності двох методик геодезичної зйомки: GNSS RTK (кінематичне позиціонування в реальному часі) та тахеометричної зйомки – при моніторингу трансформацій землекористування.

Актуальність обраної теми визначається зростаючим попитом на оперативне й високоточне оновлення просторових даних, критичне для землеустрою, кадастру та міського планування.

Основна мета дослідження – встановлення найбільш оптимального методу геодезичного контролю змін землекористування шляхом оцінювання точності, а також аналізу переваг і недоліків використання GNSS RTK та тахеометрії.

Для досягнення визначеної мети передбачено виконання таких етапів:

- Провести теоретичне дослідження принципів роботи GNSS RTK та тахеометричної зйомки.
- Здійснити практичні вимірювання, використовуючи обидва підходи.
- Виконати обробку отриманих даних та оцінити точність визначення положення точок.
- Порівняти сильні та слабкі сторони кожного з методів, з огляду на особливості конкретної території.

Об'єктом дослідження обрано земельні ділянки, де відбуваються зміни у сфері землевпорядкування.

Предметом вивчення є відповідність методів GNSS RTK та тахеометричного знімання для виявлення цих змін.

У процесі роботи порівняно виміри, отримані різними методами, враховуючи фактори, що впливають на точність: характеристики місцевості, наявність перешкод та щільність забудови.

За результатами аналізу сформульовано висновки щодо доцільності застосування кожного з методів в різних ситуаціях.

Отримані дані можуть стати в нагоді фахівцям у галузях геодезії, землевпорядкування та кадастру, сприяючи підвищенню ефективності та точності просторових вимірювань.

## Abstract

This bachelor's thesis provides a comparative analysis of the accuracy of two geodetic surveying methods: GNSS RTK (real-time kinematic positioning) and tacheometric surveying - when monitoring land use transformations.

The relevance of the chosen topic is determined by the growing demand for operational and high-precision updating of spatial data, critical for land management, cadastre and urban planning.

The main goal of the study is to establish the most optimal method of geodetic control of land use changes by assessing the accuracy, as well as analyzing the advantages and disadvantages of using GNSS RTK and tacheometry.

To achieve the specified goal, the following stages are planned:

- Conduct a theoretical study of the principles of operation of GNSS RTK and tacheometric surveying.
- Carry out practical measurements using both approaches.
- Process the obtained data and assess the accuracy of determining the position of points.
- Compare the strengths and weaknesses of each method, taking into account the characteristics of a specific territory.

The object of the study was selected land plots where changes in the field of land management are taking place.

The subject of the study is the correspondence of GNSS RTK methods and tacheometric surveying to detect these changes.

In the process of work, measurements obtained by different methods are compared, taking into account factors that affect accuracy: terrain characteristics, the presence of obstacles and building density.

Based on the results of the analysis, conclusions are formulated regarding the feasibility of using each of the methods in different situations.

The data obtained can be useful to specialists in the fields of geodesy, land management and cadastre, contributing to increasing the efficiency and accuracy of spatial measurements.

## Вступ

У сьогоднішній день, коли пріоритетом є ошадливе використання природних багатств, сталий розвиток та підвищення точності просторових відомостей, надзвичайно важливим стає відстеження трансформацій у землекористуванні.

Своєчасне та достовірне виявлення змін у використанні земельних наділів є ключем до підтримки державного земельного кадастру, містобудівного планування, контролю за станом довкілля та землевпорядкування в цілому.

Для ефективного отримання інформації про просторові характеристики об'єктів застосовуються різноманітні методи геодезичних вимірювань.

Найбільш поширеними серед них є тахеометричне знімання та GNSS RTK-технологія.

Кожен з цих підходів володіє власними плюсами і мінусами, які визначаються сукупністю технічних параметрів задіяної апаратури та специфікою виконання поставлених задач.

GNSS RTK забезпечує можливість швидкого отримання координат з високою деталізацією в режимі онлайн, проте його працездатність погіршується в областях з обмеженим доступом до супутникового сигналу або під впливом електромагнітних перешкод.

Тахеометрична зйомка, зі свого боку, демонструє відмінну точність навіть на важкодоступних ділянках, проте вимагає суттєво більших часових витрат і залучення трудових ресурсів.

Практична цінність цього дослідження полягає у розробці порад стосовно вибору найбільш результативного способу геодезичних вимірювань, враховуючи необхідність спостереження за змінами у використанні земельних ресурсів.

Результати можуть стати у пригоді інженерам-геодезістам, землевпорядникам, кадастровим реєстраторам, а також усім спеціалістам, що працюють з геоінформаційними технологіями.

## **1. Теоретичні основи застосування GNSS RTK та тахеометричного знімання у геодезичних та землевпорядних роботах**

Глобальна система позиціонування (GPS) – це всепогодна космічна навігаційна система, яка широко використовується в цивільній сфері.

Один з найпопулярніших способів використання GPS – кінематичне позиціонування в реальному часі (RTK). Воно дозволяє оперативно й з високою точністю збирати дані про зміни в землекористуванні.

Проте, RTK має свої обмеження і не завжди ефективно, зокрема в міських умовах з щільною забудовою або під кронами дерев, де сигнал від супутників може блокуватися або послаблюватися.

У таких ситуаціях доцільно доповнювати RTK класичними наземними методами, наприклад, тахеометричною зйомкою.

Інформація, здобута завдяки RTK або тахеометрії, інтегрується в наявні системи управління земельними ресурсами, що дозволяє класифікувати різноманіття змін у землекористуванні з використанням геоінформаційних систем (ГІС) за визначеними категоріями.

Щоб мінімізувати обсяг польових досліджень, зумовлених використанням RTK та тахеометричних зйомок, а також для оперативного та точного отримання просторових даних про зміни в землекористуванні у конкретному регіоні, потрібно впроваджувати оптимізовані та ефективні методи польових вимірювань.

Одним із підходів може бути аналіз цілісного призначення землекористування та екологічних характеристик території.

У контексті поставленої мети дослідження, було сформульовано такі задачі:

1. Здійснити порівняльний аналіз ефективності використання RTK та тахеометричної зйомки для збору та актуалізації даних про

землекористання, враховуючи показники точності, оперативності й інші відповідні характеристики.

2. Провести дослідження тенденцій змін землекористування в обраних регіонах.

3. Розробити дієву методику збирання просторових відомостей про зміни землекористування, застосовуючи GPS-технології, беручи до уваги визначені типи змін.

4. Забезпечити перетворення отриманих даних про зміни землекористування у формати, пристосовані для подальшого використання в геоінформаційних системах (ГІС).

Для верифікації результативності використання RTK та тахеометричної зйомки в контексті отримання даних про трансформації землекористування, було обрано ділянку мікрорайону «Каскад» міста Івано-Франківськ, що демонструвала зміни цільового призначення протягом певного часового відрізка.

З метою виявлення можливих сценаріїв змін у використанні земель, було здійснено аналіз кадастрових карт для цього мікрорайону, охоплюючи різні періоди часу.

Попередні результати, здобуті в ході вивчення, показують наступне:

1. Горизонтальна точність фіксації координат з застосуванням RTK сягає  $14 \text{ мм} \pm 4 \text{ мм}$ . На противагу цьому, для тахеометричної зйомки цей параметр досягає  $163 \text{ мм} \pm 63 \text{ мм}$ . (Координати контрольних пунктів було взято за еталонні, порашовані з використанням статичного GPS).

2. В середньому, тривалість часу, потрібна для визначення координат однієї точки, дорівнює близько 15 секунд для RTK та 240 секунд для тахеометричної зйомки.

3. Види змін землекористування в досліджуваній області можна розподілити на три ключові категорії полігонів, кожна з котрих має 2–3 типові стилі.

4. Введення розроблених методів польових геодезичних робіт сприяє помітному скороченню об'єму необхідних вимірювань.

### **1.1. Сучасні технології геодезичних вимірювань: загальний огляд**

У сучасній геодезії спостерігається активний розвиток інноваційних технологій просторових вимірювань, що забезпечують високу точність для топографічних, кадастрових, інженерно-геодезичних та землевпорядних робіт.

Найбільш широко застосовуваними інструментальними методами є супутникові технології, базуються на глобальних навігаційних супутникових системах (GNSS), та електронні тахеометри, котрі дозволяють з надзвичайною точністю вимірювати горизонтальні та вертикальні кути, а також відстані.

Вибір конкретної методики геодезичного супроводу визначається низкою чинників, серед яких: специфіка об'єкта, вимоги до точності, часові рамки реалізації робіт, складність місцевості, наявність інженерних комунікацій та інші аспекти.

В даному випадку, технології GNSS RTK та тахеометрична зйомка є лідерами, оскільки гарантують швидке отримання координат з високим ступенем надійності безпосередньо у польових умовах.

### **1.2. Суть та принцип роботи GNSS RTK**

GNSS RTK (Real-Time Kinematic) – це надзвичайно точна техніка позиціонування, що використовує диференціальний підхід до обробки фазових вимірювань сигналів навігаційних супутників у реальному часі.

Основний плюс GNSS RTK полягає у можливості з високою точністю визначати координати точок (від 1 до 3 см по горизонталі), за умови безперервного зв'язку з базовою станцією або мережею референтних станцій.

Основоположні складові системи GNSS RTK:

- **Ровер (пересувний приймач)** — здійснює прийом сигналів з супутників, а також виправні дані з базової станції;
- **Базова станція** — відповідає за надсилання поправок для виключення систематичних похибок супутникового позиціонування;
- **Канал зв'язку (радіоканал, GSM або інтернет)** — забезпечує транспортування поправок в реальному часі.

GNSS RTK набула широкого вжитку в інженерній геодезії, будівництві, кадастрі та моніторингу, відзначаючись мобільністю, високою продуктивністю та здатністю функціонувати без прив'язки до закріплених реперів.

Більше того, ця технологія корелює з геоінформаційними системами (ГІС), гарантуючи легкість інтеграції просторових відомостей.

Проте, потрібно брати до уваги деякі аспекти GNSS RTK, які накладають обмеження:

- потреба у відкритому горизонті для забезпечення безперервного отримання супутникових сигналів;
- погіршення точності визначення координат у зоні впливу перепоп (споруди, зелені насадження, мости);
- залежність від якості каналу зв'язку з базовою станцією.

### 1.3. Принципи роботи тахеометра та сфери його застосування

Тахеометр – це геодезичний прилад, що слугує для вимірювання кутів, як по горизонталі, так і по вертикалі, а також похилих відстаней до визначених пунктів на місцевості.

На основі таких вимірювань обчислюються координати точок у тривимірній просторовій системі.

Новітні електронні тахеометри обладнані вмонтованими мікропроцесорами, пам'яттю для зберігання даних, а також інтерфейсами бездротового зв'язку, наприклад, Bluetooth або Wi-Fi. Це суттєво підвищує ефективність та спрощує процес виконання геодезичних робіт.

До ключових переваг тахеометричної зйомки належить:

- висока точність вимірювань, що може досягати 1–2 мм;
- можливість роботи у важкодоступних чи обмежених місцях, де відсутній сигнал супутників;
- незалежність від супутникової навігації та мобільного зв'язку;
- ідеально підходить для детального знімання складних об'єктів, таких як будівлі, інженерні комунікації, елементи рельєфу.

Тахеометри демонструють свою корисність, коли потрібно забезпечити надзвичайну точність вимірювань на невеликих територіях, при створенні локальних геодезичних мереж, при роботі в умовах щільної міської забудови, а також в лісах або під землею.

Мінусами даного методу є:

- значно більша затрата часу і зусиль в порівнянні з GNSS технологіями;
- потреба у прямому візуальному контакті між тахеометром та відбивачем;
- обмежена мобільність, якщо порівнювати з супутниковим устаткуванням.

#### 1.4. Порівняльна характеристика GNSS RTK та тахеометричного знімання

<b>Критерій</b>	<b>GNSS RTK</b>	<b>Тахеометр</b>
<b>Точність</b>	1–3 см (горизонтально), до 5 см (вертикально)	1–2 мм (на коротких відстанях)
<b>Продуктивність</b>	Висока	Середня
<b>Умови роботи</b>	Відкритий горизонт, хороший зв'язок	Можлива робота в закритих умовах
<b>Залежність від обладнання</b>	Потребує базової станції та зв'язку	Потребує лише самого приладу
<b>Сфера застосування</b>	Моніторинг, кадастр, будівництво, агро	Будівництво, планування, інвентаризація
<b>Витрати часу на зйомку</b>	Мінімальні	Залежні від складності об'єкта
<b>Вартість обладнання</b>	Висока	Відносно нижча (для оптичних тахеометрів)

#### 1.5. Практичне значення вибору методу в землепорядних роботах

У землепорядних роботах ретельний вибір методу зйомки критично важливий для забезпечення високої точності визначення меж земельних ділянок, підготовки кадастрової документації, планування меж населених пунктів і ефективного моніторингу змін у землекористуванні.

Технологія GNSS RTK виступає ідеальним рішенням для виконання робіт на великих територіях, де першочергове значення мають швидкість збору координатних даних і їх точність.

Вона широко застосовується у сільському господарстві, при проведенні земельної інвентаризації та складанні кадастрових планів. GNSS RTK забезпечує швидкість, мобільність, зменшуючи час польових робіт.

Водночас тахеометрична зйомка є незамінною в складних умовах, скажімо, в густо забудованих міських районах, там, де є обмеження або відсутність сигналу супутника, а також у випадках потреби детального знімання складних об'єктів — будівель, інженерних комунікацій, природних форм рельєфу.

Отже, обидві технології відіграють ключову роль у сучасному геодезичному вимірюванні та управлінні земельними ділянками.

Їх комплексне використання дає змогу найкращим чином адаптуватися до конкретних вимог виробництва, гарантуючи високу точність та швидкість виконання поставлених завдань, що, в свою чергу, підвищує ефективність управління земельними ресурсами.

## **2. Організація та виконання польових робіт для моніторингу змін землекористування**

### **2.1. Вибір ділянки дослідження та обґрунтування методики**

Для здійснення порівняльного аналізу точності GNSS RTK та тахеометричної зйомки було обрано дослідну площу близько 1,5 га, яка розташована на межі забудованих площ.

Таке рішення дозволяє оцінити працездатність кожного методу як на відкритому просторі, так і в умовах часткового обмеження видимості (наявність рослинності, огорож, споруд).

Перед початком знімання було розроблено наступну методику:

- Визначення мережі пунктів зйомки (реперів, змінних контурів, меж території);
- Здійснення GNSS RTK-знімання з фіксацією координат в режимі реального часу;
- Повторне знімання тих же самих пунктів за допомогою електронного тахеометра;
- Зіставлення отриманих координат та аналіз похибок.

Обидва види знімання було проведено в єдиній системі координат УСК-2000 з прив'язкою до постійної геодезичної мережі..

### **2.2. Виконання знімання методом GNSS RTK**

Для здійснення зйомки було використано GNSS-приймач Stonex S900 з під'єднанням до регіональної мережі базових станцій за допомогою інтернету.

Метод зйомки – RTK (Real-Time Kinematic) у режимі фіксованого рішення (FIX).

Приклад розташування приймача над точкою спостереження показано на рисунку 1.



Рисунок 1 GNSS приймач Stonex S900

Послідовність виконання робіт:

1. З'єднання з базовою станцією за допомогою мобільного інтернету.
2. Первинна перевірка точності: з використанням контрольної точки з визначеними координатами.
3. Визначення координат вибраних точок з тривалістю фіксації 5–7 секунд.
4. Створення карти меж ділянок, ліній забудови та об'єктів інфраструктури.

Обставини проведення робіт:

- \* Метеоумови: безхмарно, без впливу атмосферних явищ.
- \* Перешкоди для сигналу: незначна кількість дерев по краях ділянки.
- \* Кількість супутників: у середньому 18–22, стабільність сигналу — добра.

Підсумки:

- \* Загалом було визначено координати 12 точок.
- \* В 45 випадках було отримано фіксоване рішення (FIX), у 3 — плаваюче (FLOAT).
- \* Середня точність відповідно до даних приймача:  $\pm 0,015$  м (горизонтально),  $\pm 0,025$  м (по висоті).

### **2.3. Виконання знімання електронним тахеометром**

Для традиційного тахеометричного знімання було застосовано електронний тахеометр Topcon ES-105.

Зовнішній вигляд приладу можна побачити на рисунку 2.



Рисунок 2 Електронний тахеометр Topcon ES-105.

Послідовність виконання робіт:

1. Встановлення тахеометра над визначеною точкою опори (репером), з орієнтуванням приладу згідно з відомим напрямом.
2. Розміщення віхи з відбивачем на точках, що підлягають зйомці, відповідно до плану.
3. Почергове вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів, а також відстаней по прямій лінії до кожної окремої точки.
4. Передача отриманих даних у контролер з подальшим обчисленням просторових координат цих точок.

Умови проведення робіт:

- Температура повітря фіксувалась на позначці  $+20^{\circ}\text{C}$ , без вітру.

- Забезпечено стабільний візуальний контакт між інструментом та вимірювальними точками.
- Відстань візирних променів варіювалась в межах від 10 до 60 метрів.  
Результати вимірювань:
- Зареєстровано ті ж 12 контрольних точок, як і при використанні GNSS RTK.
- Середня похибка визначення координат становила  $\pm 0,005$  м по горизонталі та  $\pm 0,007$  м по вертикалі.
- Зібрані дані було збережено у форматі .csv для подальшої обробки та аналізу.

#### **2.4. Методика оцінки точності результатів**

Для об'єктивного зіставлення результатів GNSS RTK та тахеометричної зйомки було застосовано спосіб координатних різниць.

Цей підхід дозволяє виявити просторові невідповідності між координатами ідентичних точок, здобутих різними методиками, що є ключовим для оцінювання точності та достовірності кожного з методів.

Усі розрахунки здійснено у програмному забезпеченні Digital, яке забезпечує комплексну автоматизацію геодезичних операцій - від опрацювання польових вимірювань до формування обмінних файлів, кадастрових планів і технічної документації.[4]

Перевагою Digital є те, що його функціонал не вимагає додаткових програмних інструментів, подібних до AutoCAD чи MapInfo, а генерує графічні та текстові матеріали, базуючись на готових шаблонах.

Це суттєво оптимізує робочий процес і дозволяє оперативно пристосовувати обробку інформації до специфічних потреб.

До того ж, Digital гарантує сумісність із поширеними форматами картографічних даних, серед яких AutoCAD DXF/DWG, ArcGIS Shape, MapInfo MID/MIF, MicroStation DGN, Панорама TXF та інші.

Програма реалізує функціональність безпосереднього відкриття та збереження растрових зображень, прив'язаних до географічних координат, у таких форматах як GeoTIFF, ArcInfo World File та MapInfo TAB.

На рисунку 3 можна побачити зразок скрипту, призначеного для аналізу похибок. Він використовується для зіставлення результатів, отриманих за допомогою двох різних методів знімання.[6]

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Завантаження даних
# CSV-файл повинен мати стовпці: 'Point', 'X_GNSS', 'Y_GNSS', 'H_GNSS', 'X_Tach',
df = pd.read_csv("data.csv")

# Обчислення різниць
df['dX'] = df['X_GNSS'] - df['X_Tach']
df['dY'] = df['Y_GNSS'] - df['Y_Tach']
df['dH'] = df['H_GNSS'] - df['H_Tach']
df['d2D'] = np.sqrt(df['dX']**2 + df['dY']**2)
df['d3D'] = np.sqrt(df['dX']**2 + df['dY']**2 + df['dH']**2)

# Основні статистики
print("Середнє 2D-відхилення:", df['d2D'].mean())
print("Максимальне 2D-відхилення:", df['d2D'].max())
print("Середнє 3D-відхилення:", df['d3D'].mean())

# Візуалізація
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.hist(df['d2D'], bins=15, color='lightgreen', edgecolor='black')
plt.title('Розподіл 2D-відхилень')
plt.xlabel('Відхилення, м')
plt.ylabel('Кількість точок')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Рисунок 3 Скрипт обробки порівняння результатів

## 2. 5 Статистичний аналіз результатів

Після опрацювання даних з польових робіт, було розраховано похибки координат для дванадцяти контрольних пунктів.

Проведено порівняльний аналіз отриманих координат, здобутих за допомогою GNSS RTK та тахеометрії, з використанням статистичних методів.

У таблиці 1 представлено узагальнені дані щодо ключових статистичних характеристик точності.

Таблиця 1 Підсумкові статистичні значення

<b>Показник</b>	<b>Значення</b>
Середнє планове відхилення	0,022 м
Максимальне планове відхилення	0,059 м
Середнє висотне відхилення	0,031 м
Максимальне висотне відхилення	0,074 м
Середнє просторове відхилення	0,039 м
Стандартне відхилення	$\pm 0,012$ м (2D)

### **3. Інтеграція RTK та тахеометра для землевпорядного знімання**

Кінематична геодезична зйомка в реальному часі (RTK) – це сучасний метод, який дає змогу з неймовірною точністю визначати координати точок місцевості в момент проведення вимірювань.

Як випливає з назви, обчислення координат відбувається миттєво, одразу після того, як мобільний (роверний) GNSS-приймач опинився в потрібній точці.

Головною особливістю RTK-технології є необхідність одночасної роботи принаймні двох GNSS-приймачів: базового (референцного) та роверного.

Базова станція розташовується в точці з відомими координатами та постійно збирає дані з супутників, що потім передаються у вигляді диференціальних поправок до роверного приймача.

Передача цих поправок відбувається або через радіоефір, або з використанням інтернет-з'єднання, наприклад, мобільного.[5,6]

Роверний приймач, у свою чергу, отримує сигнали від супутників та, окрім того, коригувальні дані від базової станції.

Спеціальне програмне забезпечення, вмонтоване в приймач, гарантує обробку даних без зволікань, що дозволяє розрахувати координати з точністю до сантиметрів прямо під час польових вимірювань.

Завдяки своїй швидкості та точності, RTK-зйомка стала надзвичайно корисною в інженерній геодезії. Її важко замінити під час виконання розбивочних операцій безпосередньо на будівничих площадках.

Крім того, RTK є невід'ємною складовою збору просторових даних, що потрібні для топографічного картографування, проведення кадастрових досліджень та аналізу місцевості.[6]

Втім, подібно до будь-якої іншої технології, метод RTK має свої недоліки. Найбільш поширеним викликом є втрата зв'язку з супутниками або базовою станцією.

Це може бути наслідком різних перешкод, серед яких: висотні споруди, густі насадження, тунелі чи глибокі ущелини.

За таких обставин неможливо домогтися стабільного визначення координат, що спричиняє зупинку функціонування RTK у відповідному режимі.

Для забезпечення безперервності геодезичних вимірювань у зонах з обмеженим прийомом сигналів з космосу, часто використовують перевірені часом методи наземної зйомки.[4,6]

Наприклад, велике поширення здобули електронні тахеометри, які об'єднують в собі можливості теодоліта, далекоміра та обчислювального пристрою.

Вони дають змогу з високою точністю вимірювати напрямки, кути та відстані, що робить їх незамінним інструментом в складних польових умовах, де GNSS-системи можуть бути непрацездатними.

Відтак, інтеграція RTK-технологій з традиційними геодезичними засобами гарантує точність та стабільність вимірювань за найрізноманітніших обставин.

Сучасні електронні тахеометри – це надзвичайно точні пристрої, спроможні автоматично визначати горизонтальні та вертикальні кути, а також похилі дистанції до цілей.

Усі отримані дані миттєво надсилаються до вмонтованого мікрокомп'ютера, що дозволяє обробляти інформацію у реальному часі.

Здобуті значення кутів та відстаней можна швидко відобразити на дисплеї приладу.

Крім того, використовуючи спеціальні програмні опції тахеометра, користувач здатний миттєво обчислювати горизонтальні та вертикальні

проекції відстаней, що суттєво полегшує процес збору просторових координат.

У ситуації, коли тахеометр зорієнтовано у відомому напрямку, та введені координати вихідної точки (наприклад, базової станції або репера), координати нової точки, на яку наведено прилад, можливо обчислити автоматично.

Завдяки вмонтованим модулям пам'яті або ж змінним картам пам'яті, усі виміряні й обчислені дані зберігаються в цифровому вигляді. Відтак, зникає необхідність у ручному перенесенні результатів у польовий журнал, що значно полегшує роботу.

У сучасній геодезії дедалі активніше використовують комбінований метод, що об'єднує GNSS-технологію RTK з тахеометричними методами.

Цей підхід забезпечує потрібну гнучкість і високу точність під час знімальних або розбивочних робіт, незалежно від етапу їх проведення.

Загальний алгоритм інтеграції RTK і тахеометра в рамках одного проєкту можна представити як таку послідовність кроків:

1. Визначення координат точки розташування роверної станції виконується з використанням технології RTK (наприклад, якщо умови прийому сигналу з супутників дозволяють).

2. У випадках, коли зв'язок RTK недоступний або ненадійний (наприклад, через наявність перешкод), для визначення координат роверної станції використовується тахеометрична зйомка.[6]

Процедура використання тахеометра за умов недосяжності RTK може включати наступні етапи:

1. Обирається пункт спостереження (його позначимо як точка А), де застосування RTK стає неможливим з огляду на технічні обмеження або природні перешкоди.

2. Відшуковуються два сусідні пункти – Б та С – що розташовані поруч з точкою А та допускають RTK-вимірювання. Вони слугуватимуть базовими контрольними орієнтирами.

3. За допомогою RTK-приймача з надзвичайно високою точністю фіксуються координати пунктів Б та С.

4. Далі, використовуючи метод прямих або зворотних засічок з тахеометром, розраховуються координати невідомої точки А, ґрунтуючись на геометричних розрахунках та відомому положенні точок Б і С.

Цей метод дає змогу забезпечувати безперервність геодезичних вимірювань незалежно від особливостей ландшафту або щільності забудови, гарантуючи при цьому максимальну точність та надійність визначених координат.[5]

### **3.1 Аналіз стилів зміни землекористування**

Інформація, здобута із застосуванням надзвичайно точних методів, зокрема RTK-систем та електронних тахеометрів, про зміни в характері землекористування, може бути інтегрована у вже наявну систему управління земельними ресурсами.

Подальша обробка цих даних у рамках географічної інформаційної системи (ГІС) дає можливість класифікувати виявлені зміни землекористування за окремими типами або стилями змін, враховуючи просторову структуру, функціональне призначення та морфологічні характеристики території.

З огляду на потребу оптимізації обсягу польових робіт, а також з метою мінімізації втрат часу та ресурсів, які пов'язані зі звичайними зніманнями з використанням RTK або тахеометра, рекомендується попереднє дослідження змін у землекористуванні досліджуваної області.[6]

Цей метод включає в себе аналіз екологічних особливостей території, визначення ступеня впливу людської діяльності, а також врахування функціонального зонування.

На основі результатів проведеного аналізу використана адаптивна стратегія збору даних, яка дає можливість зосередитись виключно на ключових ділянках змін, уникнувши повторного проведення вимірювань.

Зазвичай візуалізація змін у використанні земель відбувається через полігональні структури.

Враховуючи комплексну природу цих об'єктів, є сенс ввести поняття головного полігону та його дочірніх складових для визначення їхніх ієрархічних відносин.

Наприклад, якщо певну територію, представлену полігоном  $Y$ , внаслідок зміни призначення землі поділено на два менші об'єкти — полігони  $Y_1$  та  $Y_2$  — то  $Y$  вважається базовим (материнським) полігоном, а  $Y_1$  та  $Y_2$  виступають його дочірніми полігонами.[5,6]

Відповідно до використаної концепції, трансформації у землекористуванні можна класифікувати на два основні різновиди:

1. Множинне подрібнення без об'єднання меж — випадки, коли вихідний багатокутник поділяється на декілька менших, але вони не встановлюють спільного просторового зв'язку з вихідним багатокутником через відсутність спільної межі.

2. Множинне подрібнення з об'єднанням меж — ситуації, коли похідні багатокутники зберігають просторовий контакт з початковим, утворюючи логічно інтегрований контур або конфігурацію, яка дає можливість відтворити вихідну форму.

До того ж, першу групу (розбиття без з'єднання меж) має рацію поділити на додаткові підкатегорії, враховуючи конфігурацію полігонів.

З тих, що зустрічаються найчастіше, можливо визначити:

- Острівний стиль – коли дочірні полігони повністю відірвані, ізольовані один від одного та не мають спільних країв;
- Кільцевий стиль – у ситуації, коли дочірні полігони формують замкнене кільце або структуру у вигляді кільця, що оточує порожній простір;
- Повний стиль – у випадку, коли поділ головного полігона спричиняє утворення сукупності суміжних полігонів, які щільно покривають усю його площу, не залишаючи пропусків та не перекриваючи один одного.

Цей спосіб сортування трансформацій дозволяє не лише грамотно організувати польові вивчення, а й гарантує ретельний аналіз змін у системі землекористування з плином часу – як на локальному, так і на регіональному масштабах.[6]

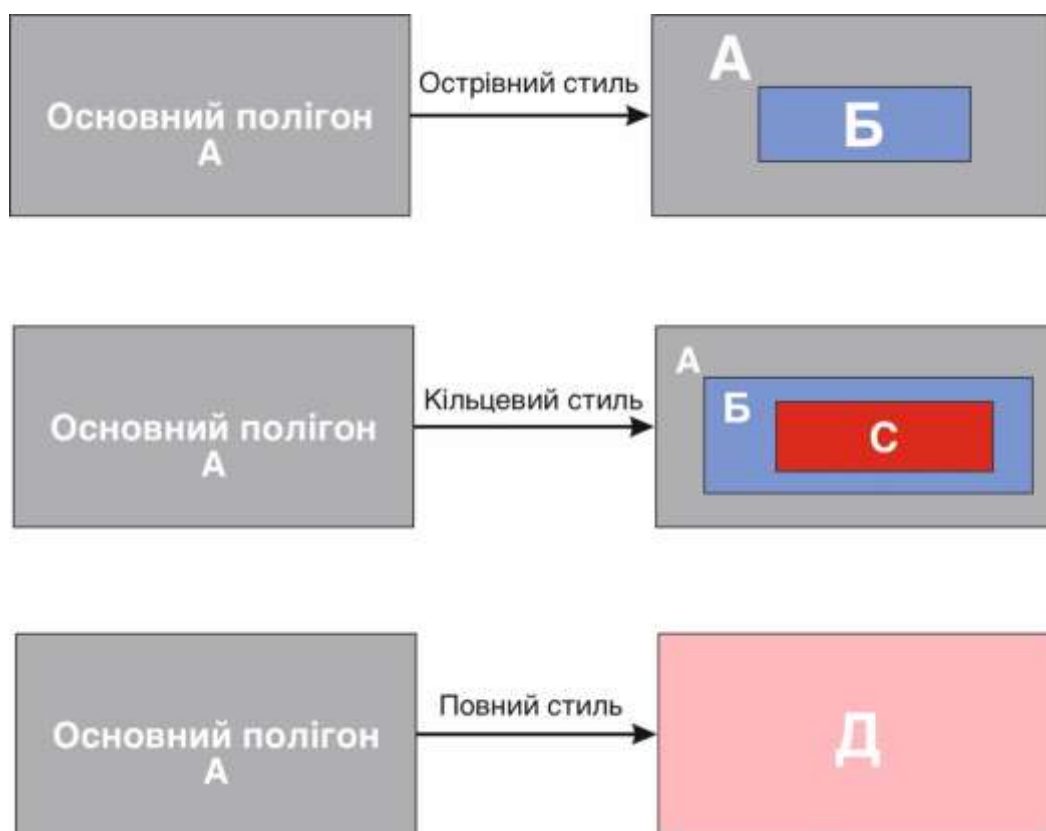


Рисунок 4. Відсутність зв'язку злиття меж між основними полігонами та дочірніми полігонами.

Інша категорія, яка стосується ситуацій розбиття одного великого багатокутника на кілька дочірніх, з умовою збереження просторового взаємозв'язку між ними завдяки спільним межам, також потребує уточнення.

В межах цієї групи виділяються три характерні способи просторової трансформації, що ілюструють різні варіанти зміни конфігурації земельної ділянки:

1. Двосторонній стиль розширення передбачає збільшення площі або модифікацію полігону, котре відбувається симетрично з двох сторін від його центральної лінії або вихідної точки.

В результаті формуються дочірні полігони, розташовані з обох боків вихідного, що утворює симетричну, або майже симетричну, конфігурацію.

2. Односторонній стиль розширення описується зміщенням меж вихідного полігону виключно в одному напрямку.

Отже, похідні елементи займають простір тільки з одного боку початкового об'єкта, вказуючи на асиметричність в розвитку землекористування.

3. Стиль об'єднання полягає в об'єднанні кількох полігонів в один, що призводить до появи нової межі, котра охоплює усі попередні.

Цей тип перетворення часто зустрічається внаслідок реорганізації чи укрупнення земельних наділів, зокрема під час земельної консолідації.

Наведені класифікації стилів продемонстровані на схематичних зображеннях на малюнку 5, що дає змогу наочно зрозуміти характерні риси кожного з описаних типів просторових перетворень. [4,5,6]

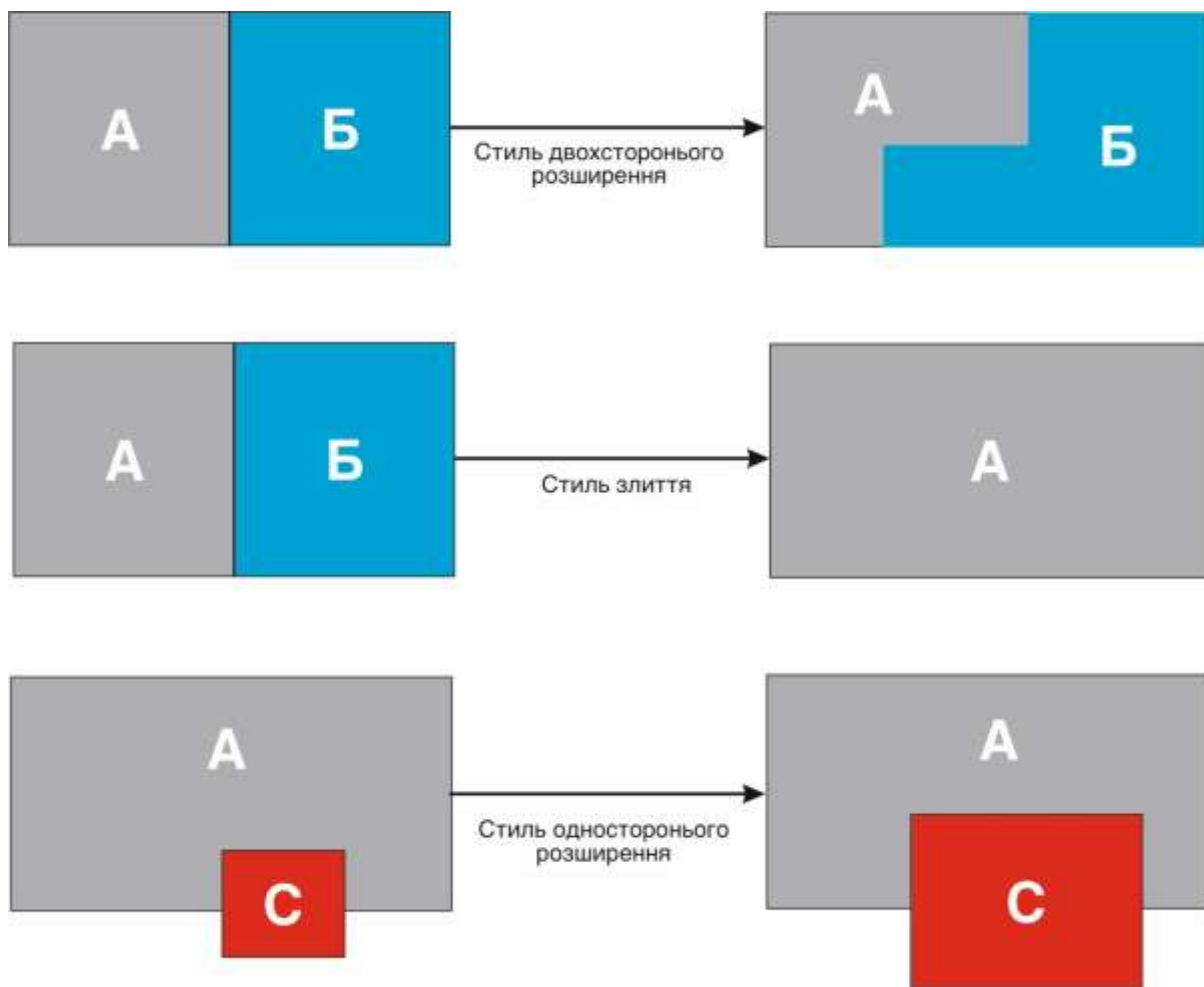


Рисунок 5. Зв'язок об'єднання меж між основним полігоном та дочірніми полігонами.

Літери А, Б, С тощо на Рисунку 4 та 5 позначають різні стилі землекористування.

### 3.2 Аналіз зміни стилю землекористування міської території

Задля глибшого розуміння сутності й просторової структури змін у землекористуванні в міських межах, провели порівняльний аналіз кадастрових карт різних часових відтинків для конкретної місцевості, беручи до уваги особливості міського будівництва.

Дослідження сконцентрували на прикладі мікрорайону "Каскад".

Це дало можливість виділити характерні патерни перетворень земельних ділянок в процесі освоєння території.

В наслідок здійснення аналізу просторових змін, зафіксованих на кадастрових планах, ключові типи трансформації землекористування, що спостерігаються в межах досліджуваної області, були систематизовані та згруповані у три основні категорії:

1. Фрагментація полігону вздовж однієї лінії поділу – це сценарій, коли вихідний (початковий) полігон ділиться на два або більше дочірніх полігони з використанням чітко визначеної межі.

Ця межа, зазвичай, виражається як вертикальна або горизонтальна лінія, що використовується як основний засіб поділу простору.

Цей тип зміни є типовим для початкового розподілу земельної ділянки з метою будівництва окремих житлових або комерційних об'єктів.

Схематичне зображення цього типу змін можна побачити на рисунку 6.[6]

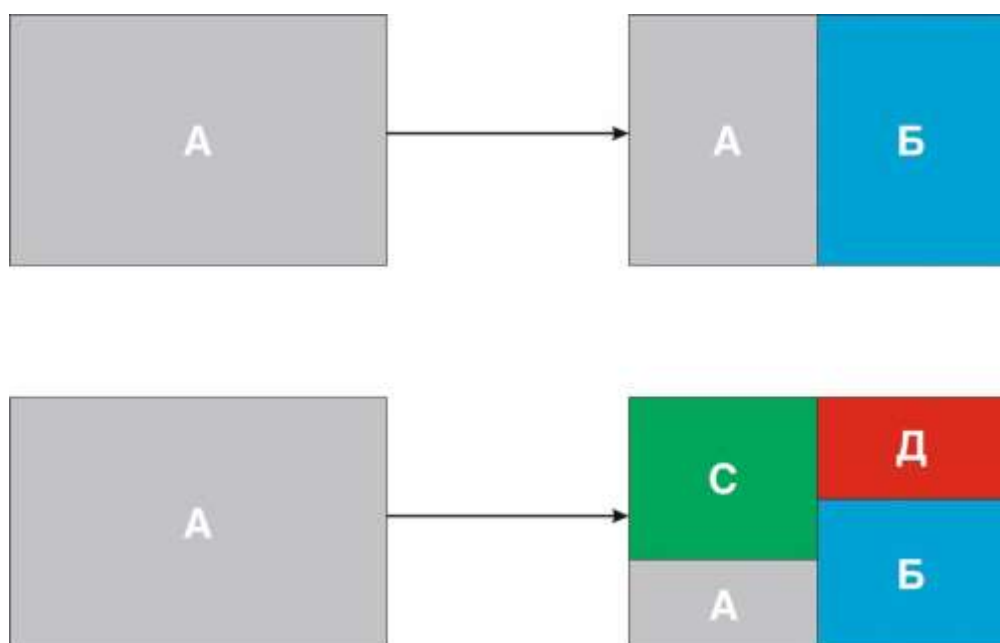


Рисунок 6. Категорія 1 стилів зміни землекористування в мікрорайоні «Каскад».

2. Багатолінійне фрагментування полігону — цей різновид трансформації землекористування визначається поділом вихідної одиниці землевпорядкування на низку дочірніх об'єктів з використанням двох або більше паралельних основоположних меж, орієнтованих вертикально чи горизонтально.

У таких умовах площа поділяється на менші ділянки, потенційно призначені для різноманітних потреб, як-от: формування окремих наділів під індивідуальне будівництво, прокладання транспортних артерій чи створення об'єктів комунального призначення.

Подібна схема поділу, як правило, зумовлена плановою урбанізацією або імплементацією нового генерального плану забудови певної місцевості.

Візуальний приклад цього стилю зображено на рисунку 7.[6]

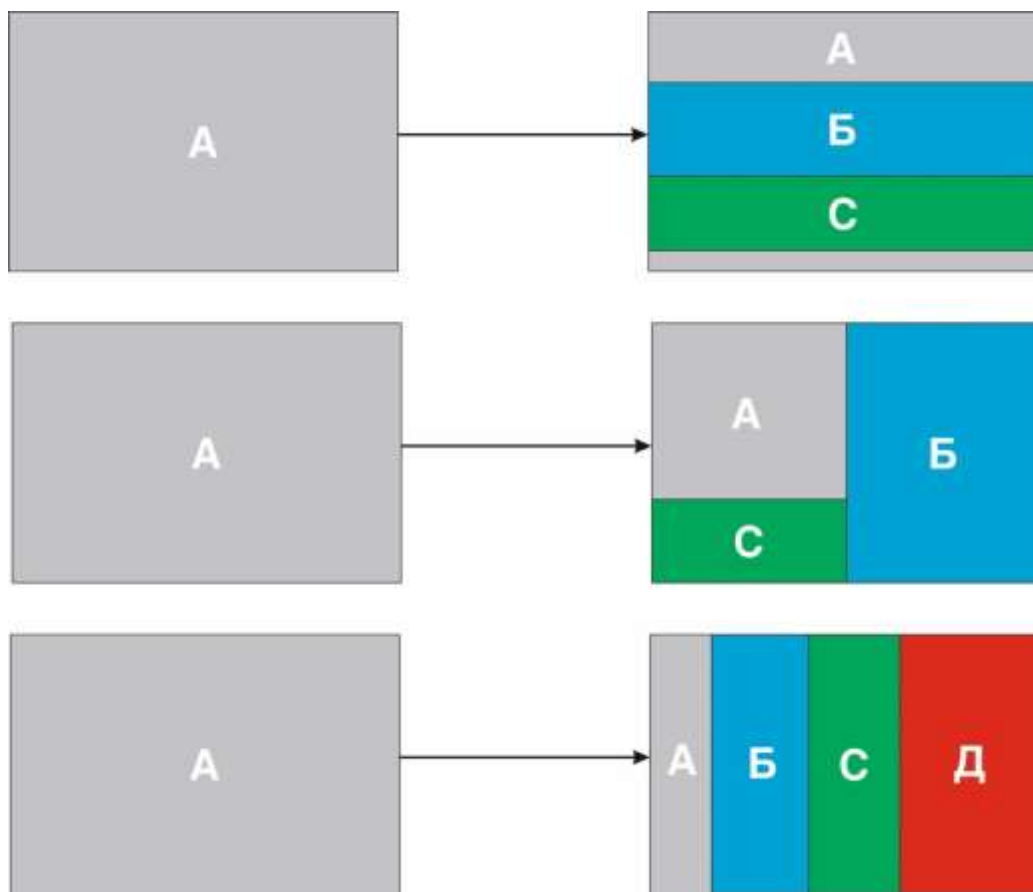


Рисунок 7. Категорія 2 стилів зміни землекористування в мікрорайоні «Каскад».

3. Об'єднання декількох полігонів в один - це коли кілька дочірніх, які межують між собою, зливаються в один головний полігон.

Такий підхід часто називають консолідацією земель.

Зазвичай його застосовують у контексті землеустрою або під час великих інфраструктурних ініціатив.

Головна задача такого перетворення полягає у вдосконаленні просторової організації землекористування, збільшенні ефективності експлуатації земельних ресурсів чи створенні єдиної функціональної області.

Графічне зображення процесу злиття полігонів показано на рисунку 8.[5,6]

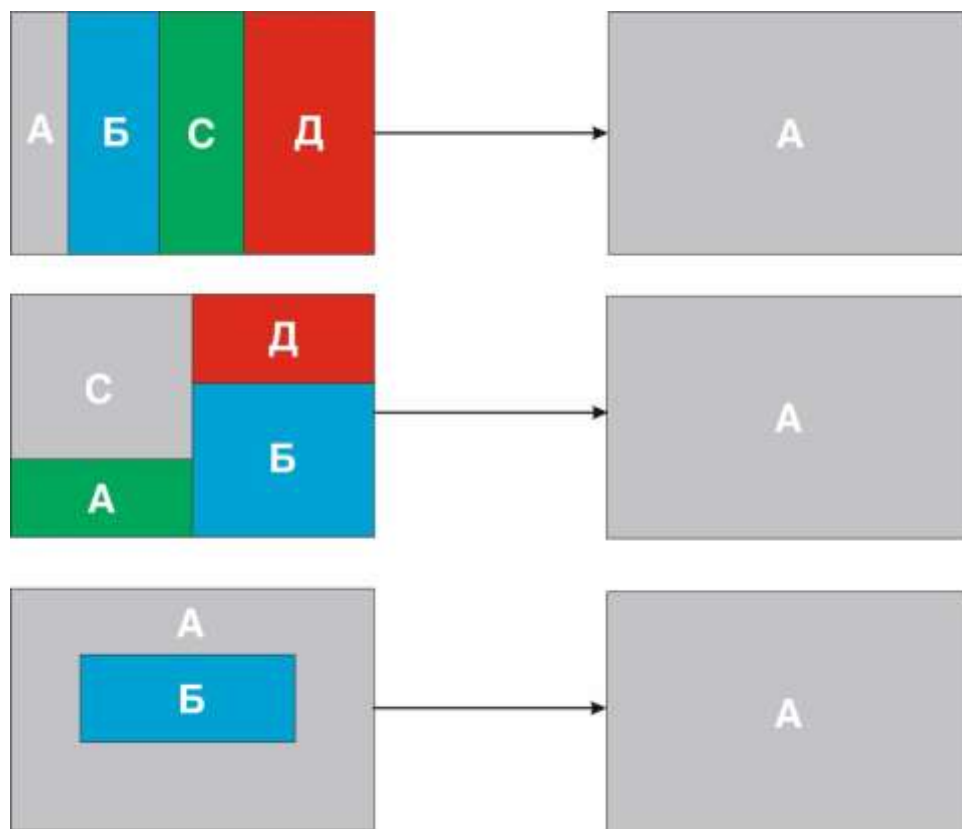


Рисунок 8. Категорія 3 стилів зміни землекористування в мікрорайоні «Каскад»

Літери А, В, С, Д тощо на рисунках 6, 7 та 8 позначають різні стилі землекористування.

### 3.3 Землевпорядні роботи із застосуванням GNSS RTK та тахеометра після аналізу змін у землекористуванні

Для показу ефективності комбінованого використання RTK-технології та тахеометричної зйомки з метою оновлення інформації про землекористування, після первинного аналізу варіантів її змін, було виконано комплексне GNSS-спостереження та тахеометричне знімання на виділеній території мікрорайону «Каскад».

Такий підхід дозволив не лише оцінити точність і продуктивність об'єднаних методів, але й забезпечити якісне оновлення просторових даних.

Схематичне зображення розташування геодезичних пунктів на дослідному полі представлено на рисунку 9.

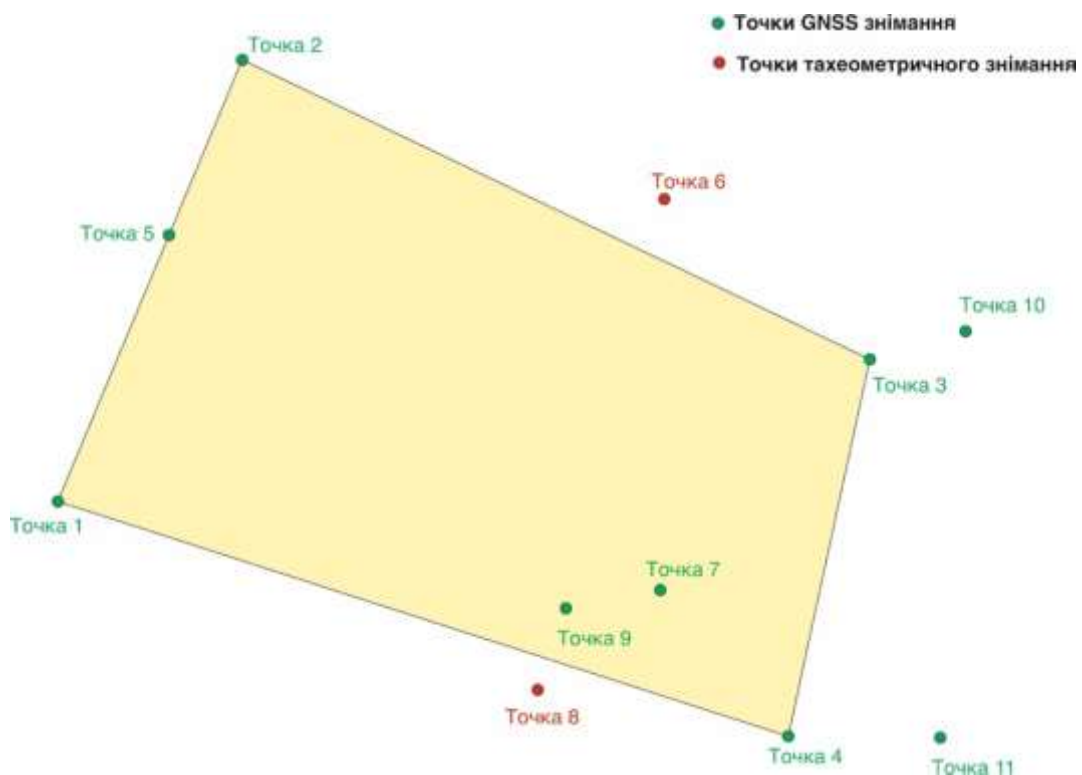


Рисунок 9 Розташування точок на тестовому майданчику

Згідно з інформацією на рисунку, точки, виділені зеленим, були обчислені за допомогою RTK-технології (кінематики в реальному часі).

Червоне ж забарвлення свідчить про застосування тахеометричного методу для визначення координат.[4]

Відповідно до схеми, представленої на рисунку 9, головний полігон А складається з чотирьох опорних точок, пронумерованих як 1, 2, 3 і 4.

Подальший аналіз, представлений на рисунку 10, показує, що цей полігон був розподілений на три менші частини — ділянка 1, ділянка 2 та ділянка 3.

Це є ілюстрацією процесу змін конфігурації землекористування, зокрема в міському контексті.

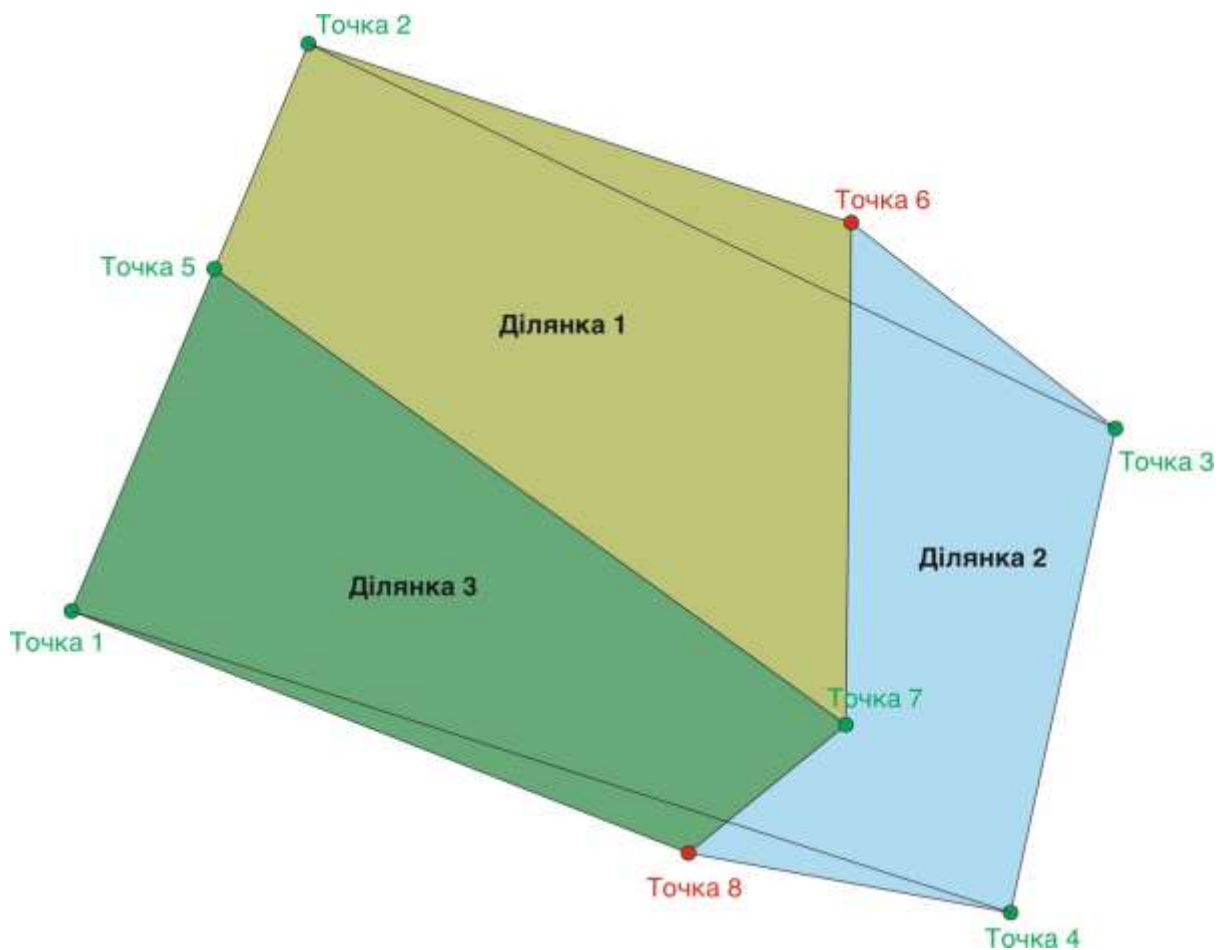


Рисунок 10. Основний полігон А поділено на 3 дочірні полігони: ділянка 1, ділянка 2 та ділянка 3.

Ділянка 1 включає в себе пункти під номерами 2, 5, 6 і 7.

До складу ділянки 2 входять пункти 3, 4, 6, 7 та 8.

Ділянку 3 складають пункти 1, 5, 7 та 8.

У зв'язку з уточненням меж базового полігону, виникла потреба повторно визначити координати пунктів 5, 6, 7 і 8.

Для цього буде використано технології GNSS RTK та тахеометричне знімання задля забезпечення актуальності просторових даних.

Задля імітації процесу двостороннього розширення було змінено розташування спільного пункту, що з'єднував ділянки 1, 2 та 3.[5]

Його перемістили з пункту 7 в нове місце під номером 9, що проілюстровано на рисунку 11.

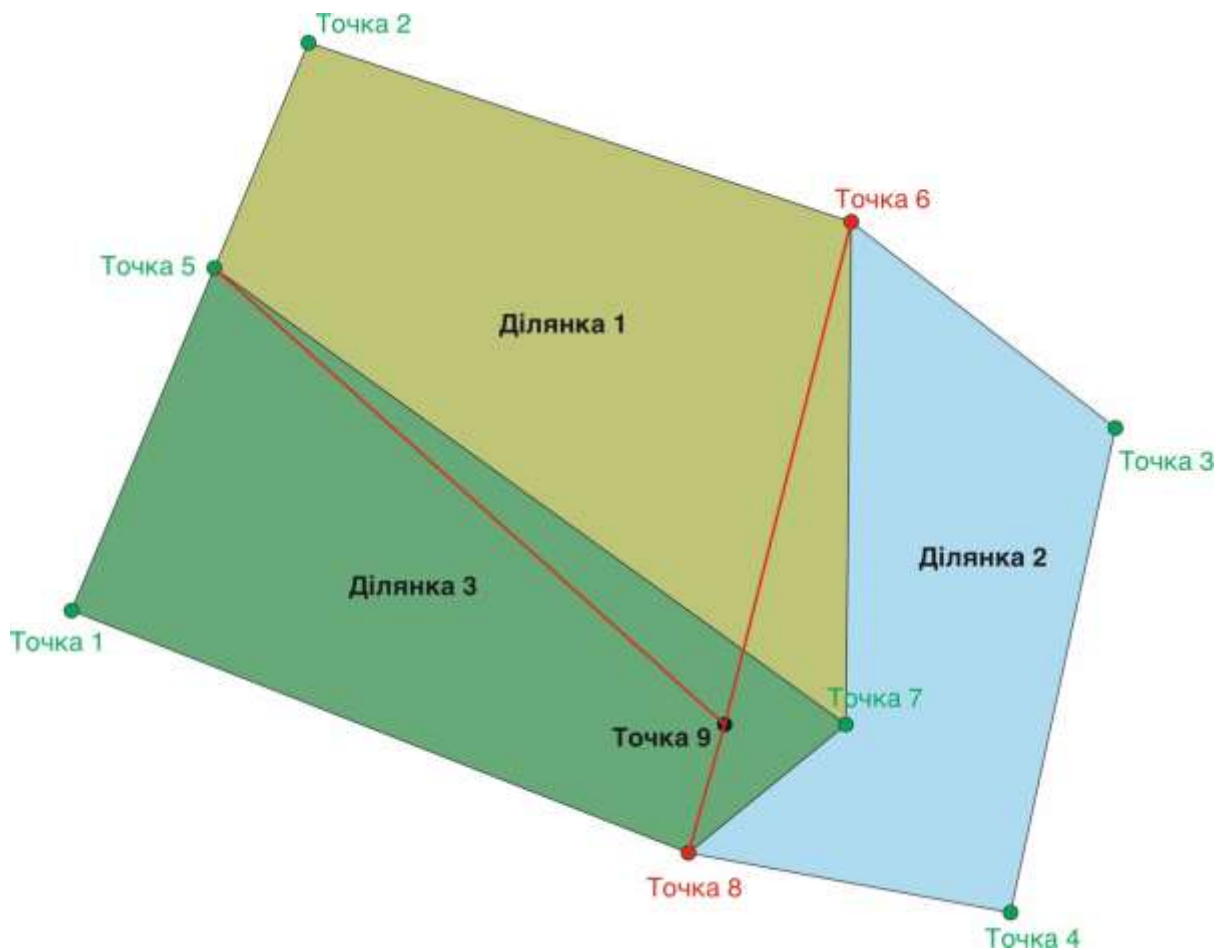


Рисунок 11. Дослідження двобічного розширення.

В межах даного дослідження ключовим завданням є коректне встановлення координат нової точки, позначеної як 9.

З метою імітації процесу одностороннього розширення, базовий багатокутник А було доповнено багатокутником Б, візуалізацію чого можна спостерігати на зображенні під номером 12.

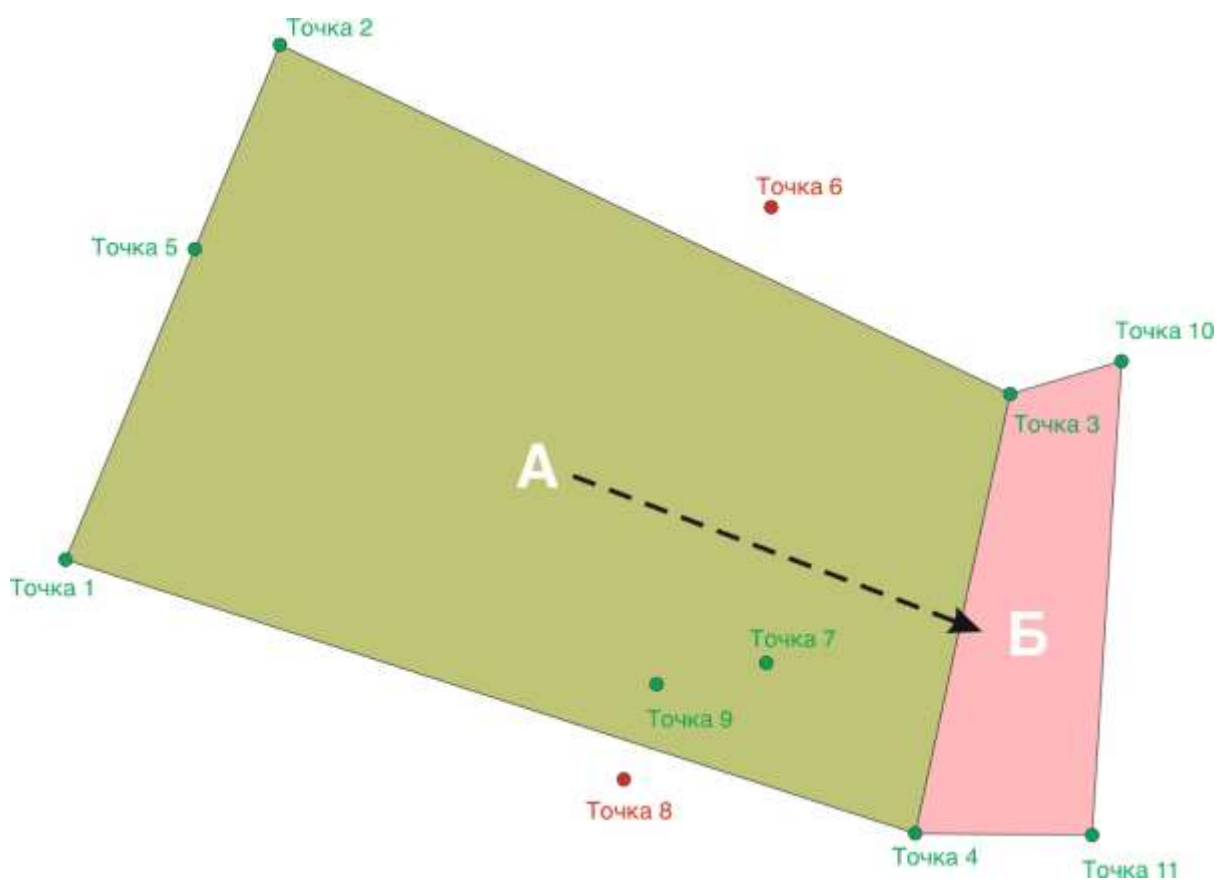


Рисунок 12. Дослідження одностороннього розширення.

Полігон В визначений точками 3, 4, 10 та 11.

В рамках цього завдання з тестування слід обчислити координати виключно точок 10 і 11, задля гарантування точності та коректності розширеного полігону.

### 3.4 Порівняння ефективності землемірних досліджень у міських районах з використанням RTK або тахеометричної зйомки

Для точного вимірювання координат та зіставлення часу виконання робіт з використанням GNSS RTK та тахеометричної зйомки, було обрано 12 постійних контрольних точок.

Розміщено їх було в мікрорайоні "Каскад".

Їх схематичне зображення представлено на рисунку 13.

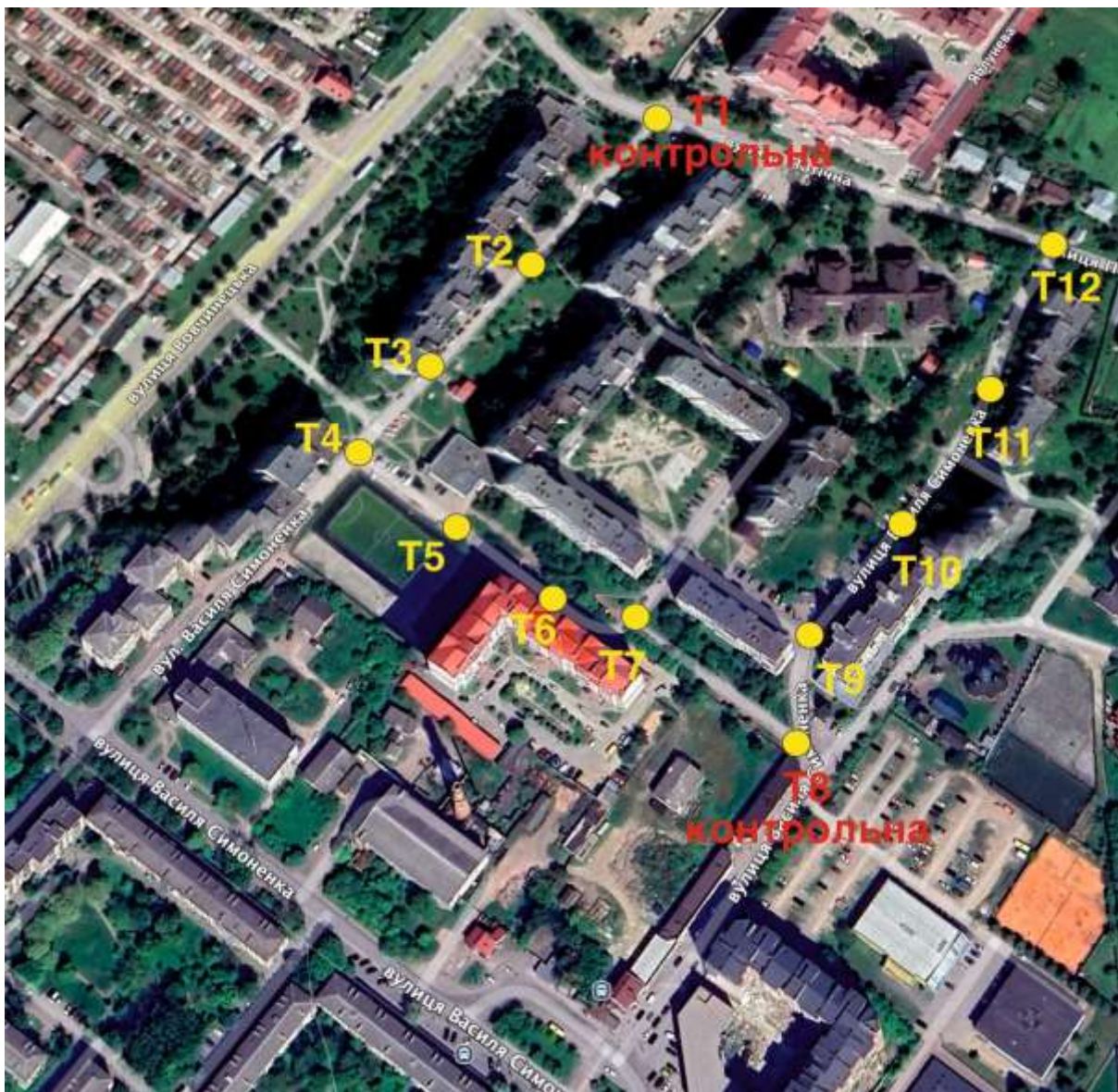


Рисунок 13. Вибрані контрольні точки на території мікрорайону «Каскад»

Спершу, через статичне GNSS-знімання, було визначено координати дванадцяти статичних точок.

У цій операції використовувався GNSS-приймач Stonex S900, який записував інформацію на кожній точці протягом тридцяти хвилин.

Отримані координати таким способом вважалися еталонними, тобто такими, що не містять похибок.

Після цього, ці ж 12 пунктів були переміряні чотири рази.

Вимірювання виконувались з використанням GNSS-приймача Stonex S900 у режимі RTK та тахеометра Topcon ES-105, відповідно.[4,5]

Як показано на рисунку 13, було обрано дві точки для тахеометричної зйомки як контрольні, а інші десять використовувались як основні контрольні точки для порівняння.

Відтак, для кожної контрольної точки є три набори координат:

1. Здобуті статичною GNSS-зйомкою,
2. Визначені методом RTK,
3. Отримані тахеометричним методом.

Для кількісного оцінювання точності визначення координат за допомогою GNSS RTK та тахеометра, були обчислені похибки координат у напрямках East ( $f_X$ ) та North ( $f_Y$ ), а також сумарна планова похибка ( $f_s$ ), відповідно до наведених вище рівнянь:

$$f_X = X - X_{\text{стат}GNSS} \quad (1)$$

$$f_Y = Y - Y_{\text{стат}GNSS} \quad (2)$$

$$f_s = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2} \quad (3)$$

$X_{\text{стат}GNSS}$  та  $Y_{\text{стат}GNSS}$  вказують на східну та північну координати точки, обчислені за допомогою статичного GNSS.[4]

А  $X, Y$  – це координати сходу та півночі тієї ж самої точки, здобуті за допомогою GNSS RTK або тахеометрії.

Для наочності розбіжностей в координатах між GNSS RTK та тахеометрією, дивіться графіки на рисунках 14, 15 і 16.[6]

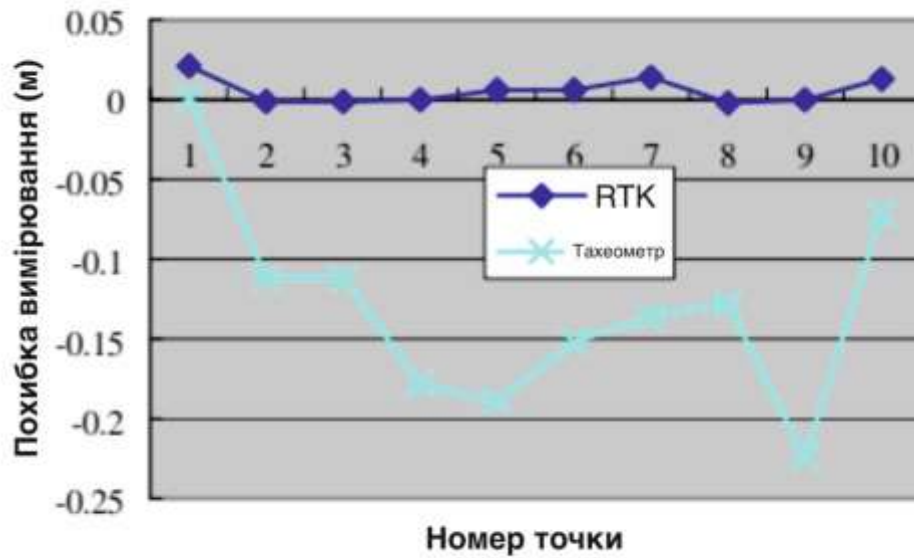


Рисунок 14. Порівняння неточності X-координат між застосуванням RTK та застосуванням тахеометра.

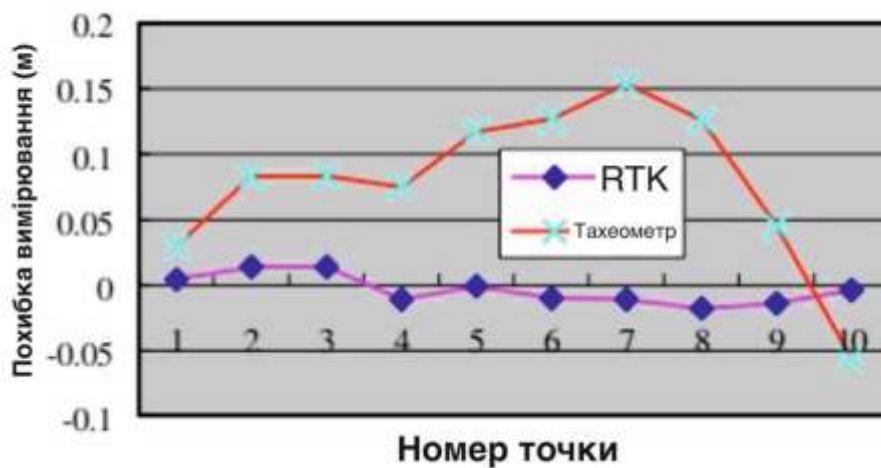


Рисунок 15. Порівняння неточності Y-координат між застосуванням RTK та застосуванням тахеометра.

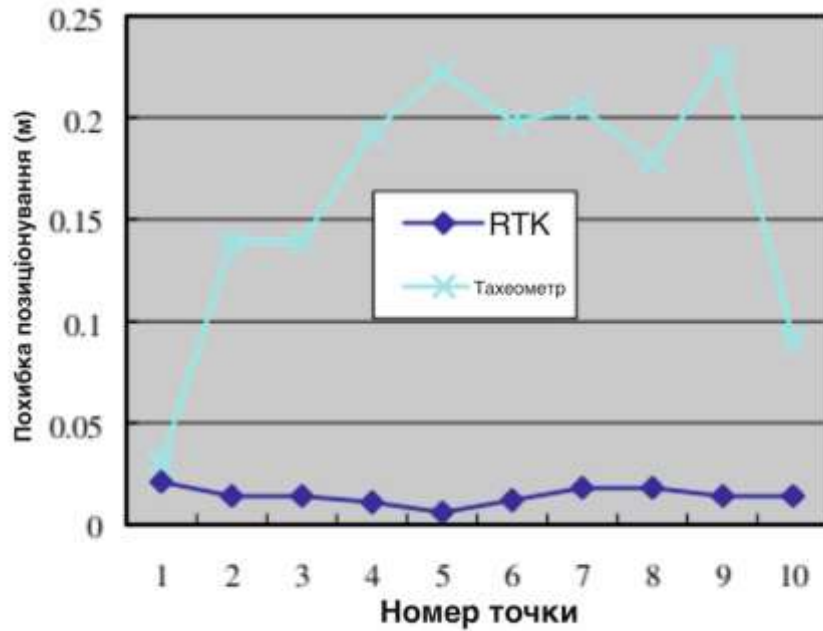


Рисунок 16. Порівняння точності позиціонування між застосуванням RTK та застосуванням тахеометра.

У таблиці 2 вміщено статистичні дані, які порівнюють точність визначення координат, використовуючи GNSS RTK та тахеометричну зйомку.[5,6]

Таблиця 2. Статистика точності (в мм) для порівняння методів GNSS RTK та тахеометрії.

Значення	GNSS RTK			Тахеометричне знімання		
	$f_x$	$f_y$	$f_s$	$f_x$	$f_y$	$f_s$
<b>Макс.</b>	21	14	21	1	154	229
<b>Мін.</b>	-2	-18	6	-224	-56	30
<b>Середнє</b>	6	-4	14	-130	78	163
<b><math>\sigma</math></b>	8	11	4	64	61	63

Зіставивши зображення 14–16 з даними таблиці 2, стає очевидним: точність визначення координат за допомогою GNSS RTK значно перевершує тахеометричні вимірювання.

Похибка GNSS RTK в середньому сягає 14 мм, з варіацією  $\pm 4$  мм. У той же час, похибка тахеометра значно більша –  $163 \text{ мм} \pm 63 \text{ мм}$ .

Окрім безпосереднього порівняння точності, було проведено аналіз й інших важливих параметрів.

Розглянуто необхідну кількість фахівців для виконання зйомок, а також час, потрібний на вимірювання кожної точки для обох методів: GNSS RTK та тахеометричного.

Результати цього порівняльного аналізу представлені у таблиці 3.

**Таблиця 3.** Порівняння продуктивності між застосуванням GNSS RTK та тахеометричного знімання.

<b>Метод знімання</b>	<b>Точність координат</b>	<b>Необхідна кількість людей</b>	<b>Необхідний час спостереження однієї точки</b>
<b>GNSS RTK</b>	14мм $\pm$ 4мм	1 людина	0.5 $\rightarrow$ 2.5 хв.
<b>Тахеометричне знімання</b>	163мм $\pm$ 63мм	3 людини і більше	4 $\rightarrow$ 8 хв.

## Висновок

Відповідно до підсумків тестування, викладеними у цій бакалаврській роботі, можна виділити такі основні тези:

1. Метод GNSS RTK зарекомендував себе як один з найефективніших засобів для отримання координатних даних у випадках, коли відбуваються зміни у землекористуванні.

Водночас, у ситуаціях, коли сигнал GNSS зазнає перешкод (скажімо, в умовах щільної міської забудови), для точного визначення координат необхідно використовувати тахеометричне знімання як додатковий метод.

2. Помилки визначення положення, що їх вдалося отримати завдяки GNSS RTK, у середньому становлять  $14 \text{ мм} \pm 4 \text{ мм}$ , тоді як при використанні тахеометра – близько  $163 \text{ мм} \pm 63 \text{ мм}$ .

3. Кожна земельпорядна ділянка, якщо розглядати її з географічної точки зору, є окремим полігоном у системі ГІС.

Виконаний з використанням запропонованих у цій роботі методів аналіз змін стилів землекористування в конкретному регіоні дозволяє заздалегідь оптимізувати обсяг польових робіт.

На основі такого аналізу є можливість визначити оптимальну кількість точок для зйомки, що позитивно впливає на підвищення ефективності та точності геодезичних досліджень.

## Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Лін, Л.С., 2003. Інтеграція GPS RTK та тахеометра для землемірного дослідження міського регіону. Тайвань, 18-19 листопада 2003 р., № С1-12, стор. 1-10.
5. Вольф, П.Р. та Гілані, К.Д., 2002. Елементарна геодезія – вступ до геоматики. Prentice Hall, Нью-Джерсі, стор. 364-366.
6. L.-S. Lin, “Application of GPS RTK and Total Station System on Dynamic Monitoring Land Use,” The XXth ISPRS Congress, Istanbul, July 2004, pp. 12-23.

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Порівняльний аналіз точності GNSS RTK та тахеометричного знімання  
при моніторингу змін землекористування ».

Обсяг пояснювальної записки: \_\_\_\_\_ аркуша.

\_\_\_\_\_ рік  
(дата)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)