

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

Кафедра геодезії та землеустрою

**Бойко Жанна**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**УДК 528.48**  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**  
**« Оцінка ефективності кінематичного GNSS-позиціонування в  
реальному часі для аналізу земельних ресурсів »**  
(назва роботи)

**193 Геодезія та землеустрій**  
(шифр і назва спеціальності)

**Ж. Бойко, студентка групи ГЗз-21-1**

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

**Науковий керівник:** **к.т.н. доцент Леся Перович**  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

**Завідувач кафедри** **проф. Микола ПРИХОДЬКО**  
(посада) (підпис) (дата) (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**

**Бойко Жанна**

*(прізвище, ім'я, по батькові)*

**1. Тема роботи: « Оцінка ефективності кінематичного GNSS-позиціонування в реальному часі для аналізу земельних ресурсів »**

**керівник роботи: к.т.н. доцент Леся Перович**

*(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. Матеріали та способи дослідження

2. Результати

3. Обробка спостережень

**5. Перелік графічного матеріалу:**

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

## 7. Календарний план

| <b>№ з/п</b> | <b>Назва етапів магістерської роботи</b>   | <b>Термін виконання етапів роботи</b> | <b>Примітки</b> |
|--------------|--|---------------------------------------|-----------------|
| <b>1</b>     | <b>1. Матеріали та способи дослідження</b> |                                       |                 |
| <b>2</b>     | <b>2. Результати</b>                       |                                       |                 |
| <b>3</b>     | <b>3. Обробка спостережень</b>             |                                       |                 |
| <b>4</b>     | <b>Оформлення бакалаврської роботи</b>     |                                       |                 |

Студент

\_\_\_\_\_ ***Бойко Ж.***  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ ***Перович Л.***

## **Анотація**

Метою даної бакалаврської роботи є аналіз точності визначення просторового положення об'єктів у лісовому середовищі з використанням технології кінематичного позиціонування у реальному часі (RTK), з урахуванням впливу різних типів насаджень (хвойних та листяних) на результати вимірювань.

### **Актуальність теми**

У сучасному світі глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) відіграють ключову роль у сфері геодезії, картографії, моніторингу довкілля та лісового господарства.

Проте густий рослинний покрив лісів, особливо в умовах щільної крони, може суттєво ускладнювати отримання точних координат.

У зв'язку з цим виникає необхідність дослідження ефективності використання RTK-методу в таких умовах.

Це дозволить розширити сфери його надійного застосування і забезпечити точне визначення координат навіть у складних природних середовищах.

### **Завдання дослідження**

- Провести тестові вимірювання в умовах хвойного та листяного лісу.
- Оцінити вплив щільності насаджень на точність RTK-визначень.
- Порівняти результати ГНСС-спостережень з даними тахеометричної зйомки.
- Проаналізувати показники точності (середні абсолютні похибки, стандартні відхилення) при коротких інтервалах спостережень.
- Зробити висновки щодо доцільності та меж застосування RTK у лісовому господарстві.

## **Наукова новизна**

Дослідження відрізняється практичною спрямованістю та використанням реальних умов, наближених до лісогосподарської діяльності.

Новизна полягає у використанні коротких 30-секундних інтервалів спостереження з оперативною обробкою на місці та залученням еталонної мережі RTK System Solution.

Особливістю є аналіз точності не лише в різних типах лісових насаджень, а й врахування впливу параметрів якості сигналу (наприклад, DOP) на результати вимірювань.

## **Науково-практичне значення**

Отримані результати є важливими для геодезистів, лісників та спеціалістів із просторового аналізу, які працюють у середовищі з обмеженим оглядом неба.

Дослідження показує, що навіть за умов щільного лісового покриву можна досягти прийнятної точності, що відкриває можливості для ефективного використання RTK у таких умовах без необхідності значних витрат на інші методи.

## **Практична цінність**

Практична цінність полягає у можливості оптимізації процесів топографічної зйомки, лісовпорядкування та навігації в лісових масивах із застосуванням ГНСС-обладнання.

## **Ключові слова:**

ГНСС, RTK, просторове положення, позиціонування в реальному часі, лісові насадження, точність вимірювань, кодові вимірювання, геодезія, супутникова навігація, DOP, тахеометрія, лісове господарство, просторовий аналіз.

## Abstract

The purpose of this bachelor's thesis is to analyze the accuracy of determining the spatial position of objects in a forest environment using real-time kinematic positioning (RTK) technology, taking into account the influence of different types of stands (coniferous and deciduous) on the measurement results.

### **Topic relevance**

In the modern world, global navigation satellite systems (GNSS) play a key role in the field of geodesy, cartography, environmental monitoring and forestry.

However, dense forest vegetation, especially in conditions of a dense crown, can significantly complicate obtaining accurate coordinates.

In this regard, there is a need to study the effectiveness of using the RTK method in such conditions.

This will expand the scope of its reliable application and ensure accurate determination of coordinates even in complex natural environments.

### **Research objectives**

- Conduct test measurements in coniferous and deciduous forest conditions.
- Assess the influence of stand density on the accuracy of RTK determinations.
- Compare the results of GNSS observations with total station survey data.
- Analyze the accuracy indicators (mean absolute errors, standard deviations) at short observation intervals.
- Draw conclusions about the feasibility and limits of RTK application in forestry.

### **Scientific novelty**

The study is characterized by a practical focus and the use of real conditions close to forestry activities.

The novelty lies in the use of short 30-second observation intervals with prompt processing on site and the involvement of the RTK System Solution reference network.

A feature is the analysis of accuracy not only in different types of forest stands, but also taking into account the influence of signal quality parameters (for example, DOP) on the measurement results.

### **Scientific and practical significance**

The results obtained are important for surveyors, foresters and spatial analysis specialists who work in an environment with limited sky visibility.

The study shows that even under dense forest cover, acceptable accuracy can be achieved, which opens up opportunities for the effective use of RTK in such conditions without the need for significant costs for other methods.

### **Practical value**

The practical value lies in the possibility of optimizing the processes of topographic surveying, forest management and navigation in forest areas using GNSS equipment.

**Keywords:** GNSS, RTK, spatial position, real-time positioning, forest stands, measurement accuracy, code measurements, geodesy, satellite navigation, DOP, total station, forestry, spatial analysis.

## **Зміст**

### **Вступ**

#### **1. Матеріали та способи дослідження**

1.1 Територія досліджень

1.2. Збирання польових відомостей

1.3 Точність та визначення похибки

1.4 Фактори, що впливають на точність визначення місця розташування за допомогою ГНСС

#### **2. Результати**

2.1 Точність ГНСС у хвойних і листяних лісах

2.2. Зміни умов функціонування ГНСС під лісовим пологом

2.3. Розміщення перепон навколо місць випробувань

2.4. Погодження точності позиціонування із показниками ГНСС

#### **3. Обробка спостережень**

3.1 Точність ГНСС у хвойних і листяних лісах

3.2. Методики визначення координату лісі за допомогою ГНСС,

3.3. Роль відносних факторів для точності ГНСС

3.4. Точність розташування ГНСС

### **Висновок**

### **Список використаних джерел**

## Вступ

З часу своєї появи у 1980-х, глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) радикально змінили ландшафт в усіх галузях, де точне визначення місцезнаходження має ключове значення.

Однією з таких сфер є управління природними ресурсами, де ГНСС перетворились на незамінний інструмент для моніторингу, збору інформації та просторового аналізу даних.

Особливо в лісовому господарстві інтеграція технології супутникового позиціонування відставала від інших секторів.

Це зумовлено тим, що щільні лісові масиви справляють значний вплив на якість прийняття сигналу з супутників, ускладнюючи здобуття високоточної інформації під наметом дерев.[4]

Проблеми з послабленням сигналу та багатопроменевими спотвореннями протягом тривалого часу були перешкодою для ефективного застосування ГНСС у лісовій галузі.

Проте, безперервний поступ технологій з часом пом'якшив ці перепони та сприяв широкому впровадженню ГНСС в лісовій галузі, інтегрувавши її в стратегію прецизійного лісового менеджменту.

Найважливішими напрямками використання супутникового позиціонування в цій царині є:

- проведення інвентаризації лісових насаджень
- створення карт земельних угідь та лісових територій
- розробка проектів, планування і будівництво лісових шляхів
- контроль та спостереження за ходом лісозаготівельних робіт
- інтеграція даних, отриманих під час польових обстежень, з інформацією дистанційного зондування
- відстеження міграцій та чисельності популяцій диких тварин

Вимоги до точності визначення положення значно різняться, все залежить від поставлених задач та навколишніх умов, в яких проводиться зйомка.[4,6]

На ключову якість даних ГНСС у лісових масивах впливають різного роду перешкоди, які фізично блокують прямий шлях радіохвиль до антени приймача.

Через це може відбуватися як погіршення точнісних показників вимірювань, так і повна втрата сигналу.

Ключовим чинником еволюції ГНСС у лісовому господарстві постає зростання кількості функціонуючих навігаційних супутників.

На сьогоднішній день чотири ключові супутникові системи (NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou) налічують більше ста космічних апаратів, які здійснюють орбітальні польоти, забезпечуючи глобальне покриття.

Інші ключові технологічні новації, що сприяли покращенню продуктивності ГНСС в умовах перешкод, охоплюють:

- запровадження додаткових сигналів, завдяки яким дво- та тричастотні приймачі здатні компенсувати вплив іоносфери;
- удосконалення диференціальних методів, зокрема, кінематичного позиціонування в реальному часі (RTK), яке використовує поправки від еталонних станцій для збільшення точності визначення координат;
- регіоналізація мереж RTK та розгортання приватних базових станцій
- корективи можуть вноситися без потреби облаштування власних базових станцій
- додаткові супутникові системи для виправлення помилок можуть бути встановлені безпосередньо або через посередників.

Окрім цього, сучасні ГНСС приймачі значно вдосконалилися у плані технологій та програмного забезпечення.

Найпершою всесвітньою навігаційною системою став NAVSTAR GPS, спроектований для встановлення координат в космічному просторі.

На сьогоднішній день, з розповсюдженням RTK-технології, ця проблема майже повністю вирішена на відкритих просторах, забезпечуючи надзвичайно точне позиціонування навіть у реальному часі.

ГНСС-системи демонструють високу точність на відкритих ділянках, проте їх продуктивність помітно знижується в складних середовищах, таких як щільна міська забудова, густі лісові масиви та пересічена місцевість з вираженим рельєфом.[5]

За таких обставин супутникові сигнали зазнають суттєвих втрат якості, що негативно відбивається на стабільності та точності визначення місцезнаходження.

Головними викликами, що постають за таких умов, є:

1. скорочення кількості супутників у зоні прямої видимості (LOS) внаслідок фізичних перепон, як-от будівлі, дерева й скелі;
2. погіршення якості супутникових сигналів.

Збільшена частота багатопроменевості виникає, коли сигнали з супутників не надходять до антени напряму, а зазнають відбиття від різних поверхонь: стін будівель, гілок дерев, рельєфу місцевості та інших перешкод.

На відміну від інших помилок ГНСС, шкідливий вплив багатопроменевості неможливо повністю усунути за допомогою диференційних поправок.

Відтак, багатопроменевість визнається ключовим обмеженням точності визначення місцезнаходження у важкодоступних локаціях, зокрема, у щільних лісових масивах і між висотними будівлями міст.

Враховуючи динамічний розвиток ГНСС-систем та супровідних методик позиціонування, необхідно періодично переглядати їхній потенціал,

особливо коли зовнішні обставини відчутно погіршують якість прийнятого сигналу.

Ось чому значний обсяг актуальних наукових розвідок спрямований на з'ясування координат у лісах.

Аналіз попередніх робіт демонструє велике розходження у здобутих даних.

Це може бути обумовлено відмінностями у методах вимірювання, технічних параметрах приймачів, кількості супутників, задіяних під час випробувань, типі застосованого методу (RTK чи статичне позиціонування), часу збору інформації та особливостях лісового покриву.

Перше масштабне дослідження точності ГНСС-позиціонування в умовах лісових масивів продемонструвало ключовий вплив висоти розміщення антени на якість приймання сигналу та точність обчислення координат.[4,6]

Зокрема, експерименти засвідчили, що антени, встановлені на позначці 4 метри над землею, забезпечили більш надійний прийом даних та кращу точність визначення розташування, у порівнянні з антенами, змонтованими на висоті 2 метри.

Дослідження додатково виявило, що спостерігається пряма кореляція між рівнем точності визначення місцезнаходження та величиною показника геометричного погіршення позиціонування супутника (PDOP).

В рамках ще одного всеосяжного експерименту, що базувався на даних диференційованої GPS (DGPS), протягом тривалого періоду в дев'ять місяців, проводився спостереження за 27 відібраними локаціями у лісовій місцевості.

Результати продемонстрували, що саме тип лісового насадження визначає ступінь точності.

У лісах з листопадними деревами похибка в середньому була в діапазоні від 7,4 до 7,5 метрів, в той час як у хвойних лісах коливання становили від 6,8 до 10,3 метрів, що залежить від особливостей рельєфу.

В ряді інших досліджень було проаналізовано ефективність використання комбінованих ГНСС-пристроїв (GPS+ГЛОНАСС) як на відкритих просторах, так і під пологом лісу.

За ідеальних умов спостереження заявлено про можливість досягнення сантиметрової точності, проте процес збору інформації характеризується значною тривалістю.

Наголошено, що перешкоди в сигналі створюють значні труднощі для отримання достовірних даних, зокрема, в місцевостях з густою рослинністю.

В рамках іншого дослідження розглянуто потенціал використання ГНСС-приймачів геодезичного класу, застосовуючи диференціальний метод, для визначення координат стовбурів дерев з метою їх картографування.[4,5,8]

Визначення розташування залежало від щільності дерев та їхнього виду, причому результати були кращими у хвойних насадженнях порівняно з листяними.

Середнє квадратичне відхилення у визначенні горизонтального положення коливалося в межах від 14 до 22 метрів.

Отже, незважаючи на те, що численні дослідження демонструють значні можливості ГНСС-технологій у лісівництві, точність локалізації у важких умовах, наприклад, у густих лісах, залишається актуальною проблемою.

Потрібні подальші дослідження й розробка нових способів виправлення помилок, аби гарантувати стабільність результатів за реальних умов.

Задля збільшення точності позиціювання в лісовій місцевості запропоновано декілька підходів з різним ступенем ефективності.

Найбільш поширеними серед цих підходів є застосування двочастотних приймачів, диференціальних ГНСС (DGPS) та методів точного позиціювання (PPP).

Окрім цього, широко використовується інтеграція сигналів з кількох супутникових систем, що дозволяє значно збільшити кількість супутників, які доступні для спостереження.

З огляду на стрімкий поступ технологій супутникового позиціонування та дефіцит відомостей про взаємодію між чинниками довкілля, зокрема, структурою лісового насадження та точністю ГНСС, у цій роботі точки було оперативно (впродовж 25 секунд) встановлено на двох ділянках з відмінним типом рослинності (листяні та хвойні породи) за допомогою ГНСС-приймачів у режимі RTK.

Невеликий термін спостережень зумовлений потребою випробувати метод ГНСС у практичних умовах лісового господарства.

Цей підхід дає змогу зібрати значно більшу кількість даних у порівнянні з аналогічними дослідженнями, де зазвичай застосовується триваліший період спостережень.

У ході нашого дослідження ми здійснили аналіз точності визначення координат по горизонталі та вертикалі, беручи до уваги можливі чинники впливу на отримані дані.

До таких чинників ми віднесли: тип лісового масиву, кут нахилу місцевості, ступінь щільності лісового покриву, показник DOP (геометричний ефект погіршення точності), а також кількість супутників, що були у зоні видимості в період спостереження.[4]

# 1. Матеріали та способи дослідження

## 1.1 Територія досліджень

Вивчення здійснювалося у лісових масивах Карпат, що розташовані на межі Івано-Франківської та Закарпатської областей.

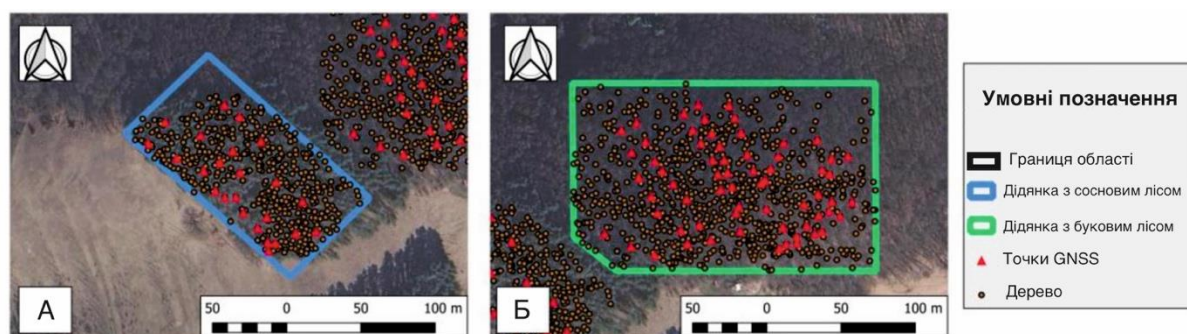


Рисунок 1. Загальне розміщення досліджуваної території

Практично вся дослідницька зона вкрита щільними лісовими масивами, що мають невисокі, але досить круті схили та пагорби, висотою від 500 до 700 метрів.

Одна з ділянок - це сосновий лісовий масив, натомість інша - листяний ліс, де буковий ліс є домінуючою породою.

Площа соснових хащів сягає орієнтовно 11 000 м<sup>2</sup>, тоді як площа листяних масивів становить близько 25 000 м<sup>2</sup>.

Загальна картина лісових угідь, де знаходяться ці території, описана в Таблиці 1.

Таблиця 1: Опис лісових масивів, на території яких знаходяться ділянки

|                | Середній нахил (град) | Вік (роки) | Об'єм (м/га) | Ступінь перекриття неба (%) |
|----------------|-----------------------|------------|--------------|-----------------------------|
| Хвойні дерева  | 15                    | 105        | 393          | 80                          |
| Листяні дерева | 10                    | 110        | 169          | 54                          |

## 1.2. Збирання польових відомостей

Аби визначити точність позиціонування ГНСС в лісових умовах, на дослідній території було розміщено точки з рівномірним інтервалом, котрі позначили кілками.

Добір місць для точок відбувався майже хаотично, але особливу увагу звертали на відстань від дерев: розташування не мало бути ближчим, ніж пів метра від стовбура, адже це може негативно вплинути на роботу ГНСС-пристрою.

Дані було отримано, використовуючи приймач ГНСС Stonex S10.

Прилад працює з усіма чотирма супутниковими системами та забезпечує точність RTK: 2,5 мм + 0,1 ppm RMS по горизонталі та 3,5 мм + 0,4 ppm RMS по вертикалі.[4]

Вимірювання здійснювались методом RTK, а корекції приймалися безпосередньо від безперервно діючої базової станції в умовах реального часу.

Пристрій розміщували над кожною координатою, використовуючи монопод з функцією вирівнювання (див. рис. 2а), після чого збирали 30 вимірювань для обчислення середньої позиції по кожній точці.

Для зниження ризику інтерференції та багатопроменевого поширення сигналу, застосовували маску кута у  $10^\circ$ , щоб відсіяти сигнали від супутників, що знаходяться поблизу горизонту.

Антени було встановлено на задалегідь визначеній висоті в 2,50 м. Це було зроблено задля досягнення максимальної стабільності та мінімізації впливу зовнішніх змінних, серед яких — сила вітру.[6]



(a)

(b)

Рисунок 2: Визначення координат опорних пунктів

Варто підкреслити, що головною задачею цього дослідження не було отримання граничної точності позиціонування, а збір координатних даних та оцінка їхньої точності.

Для досягнення поставленої мети використовувався верхній поріг для PDOP (до 8), а приймач продовжував збір даних до моменту утримання зв'язку з базовою станцією, навіть якщо рішення про фіксовану чи плаваючу точку не було отримано.

З огляду на ту ж мету, пороги для шуму сигналу не застосовувались.

Отже, процес збирання даних ГНСС завершувався виключно у випадках переходу приймача в автономний режим, спричинений короткочасними перебоями у роботі GPRS-з'єднання.[4,7]

Отримані координати, що відповідають стандарту WGS84, який є типовим для супутникових навігаційних систем (ГНСС), були трансформовані до української системи координат УСК-2000.

Ці дані були безпосередньо інтегровані в програмне забезпечення приймача.

Для зіставлення результатів, окрім даних ГНСС, було проведено традиційні вимірювання на місцевості з використанням тахеометра.

На кожній дослідній території облаштовано по п'ять точок опори в межах полігону та три зовні.

Кожну точку вимірювали двічі, зранку та ввечері, для фіксації будь-яких змін у конфігурації супутника (див. Рис. 2b).[4]

Середнє положення, отримане для кожного спостереження, обчислювали, використовуючи 1 секунду, що відповідає 300 епохам.

В даному дослідженні поріг PDOP був заданий значенням 2, що забезпечувало збереження лише надійних даних.

Використовувався метод «холодного старту» для кожного нового вимірювання.

Це означає, що ГНСС-приймач було вимкнено, а потім повторно ввімкнено після кожних 300 епох вимірювань.

Таблиця 2: Координати контрольних точок, що використовувались для розрахунку траєкторії

| № точки        | X (на схід)<br>(м) | Y (на північ)<br>(м) | Z (м)   |
|----------------|--------------------|----------------------|---------|
| 1              | 550,791.879        | 468,996.465          | 597.852 |
|                | 550,791.828        | 468,996.423          | 597.771 |
| різниця        | 0.051              | 0.042                | 0.081   |
| 2              | 550,772.404        | 550,772.479          | 605.206 |
|                | 550,909.363        | 550,772.404          | 605.194 |
| різниця        | 0.041              | 0.075                | 0.012   |
| 7 <sup>3</sup> | 550,909.363        | 468,957.217          | 617.306 |
|                | 550,909.353        | 468,957.209          | 617.268 |
| різниця        | 0.010              | 0.008                | 0.038   |
| 8              | 550,985.187        | 469,003.180          | 649.158 |
|                | 550,985.181        | 469,003.165          | 649.151 |
| різниця        | 0.006              | 0.015                | 0.007   |
| 14             | 551,034.388        | 469,007.828          | 652.018 |
|                | 551,034.387        | 469,007.824          | 652.005 |
| різниця        | 0.001              | 0.004                | 0.013   |

\*У зв'язку з воєнним станом всі координати в цій роботі змінені

Так само було знайдено ще одну замкнену траєкторію, утворену сімома пунктами, в області листяного накриття.

Похибки у встановленні координат варіювались від 2 до 4 см по горизонталі та від 6 до 8 см по вертикалі.

У процесі топографічних вимірювань також реєструвались позиції стовбурів дерев; виявлено 785 стовбурів, серед яких 432 належали хвойним і 353 — листяним.

Сумарно визначено 89 контрольних точок, причому 65 було локалізовано в листяних масивах, а 24 – у хвойних.

Незначна щільність вимірювальних пунктів у хвойних лісах обумовлена щільним підліском, котрий перешкоджає вільному пересуванню виконавця робіт, а також звужує сектор огляду тахеометра.

Польове обстеження здійснювалось протягом квітня-травня 2021 року. Отримані дані продемонстрували, що показники стану листяних насаджень зазнають коливань у відповідності до метеорологічних умов.

Візуальне представлення стану пологу лісу у хвойних масивах представлено на рисунку 3, тоді як відповідна інформація для листяних масивів міститься на рисунку 4.[4,5]

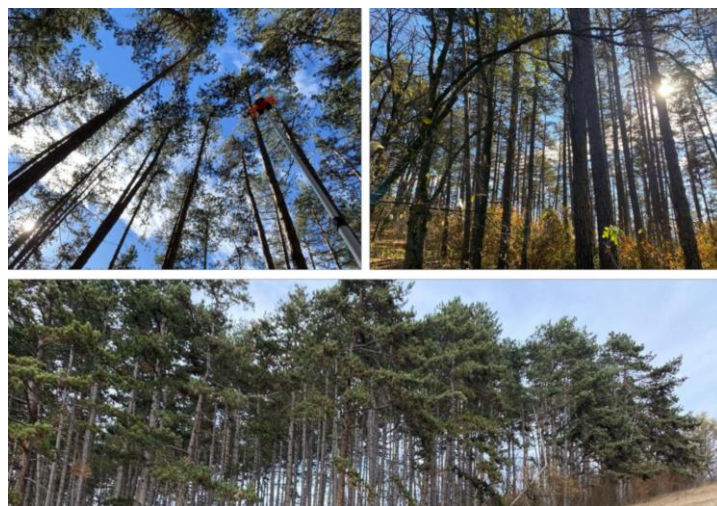


Рисунок 3. Умови експериментальної ділянки, що знаходиться в сосновому лісі.



Рисунок 4. Умови експериментальної ділянки, що знаходиться у листяному лісі.

### 1.3 Точність та визначення похибки

Вимірювання, виконані за допомогою ГНСС багато разів, дозволяють нам визначити похибку.

Проте, реальну точність можливо оцінити лише порівнюючи результати з еталонними даними, які в цьому випадку отримані завдяки традиційним геодезичним способам.

Точність визначається та зберігається безпосередньо GPS-приймачем, що стосується горизонтального та вертикального напрямків.

Вона представляє собою стандартне відхилення від кількох вимірювань, зафіксованих для кожної окремої точки.

Щодо самої точності, то горизонтальна та вертикальна складові оцінюються роздільно.

Це включає в себе обчислення горизонтальної похибки ( $e_H$ ) та вертикальної похибки ( $e_Z$ ).[4]

$$e_H = \sqrt{(X_{ГНСС} - X_{баз})^2 + (Y_{ГНСС} - Y_{баз})^2} \quad (1)$$

$$e_H = Z_{ГНСС} - z_{баз} \quad (2)$$

де

$X_{ГНСС}$ ,  $Y_{ГНСС}$ ,  $Z_{ГНСС}$  – координати, визначені приймачем,

$X_{баз}$ ,  $Y_{баз}$ ,  $Z_{баз}$  – опорні координати з топографічної зйомки.

Визначивши індивідуальні відхилення для кожної окремої точки, стає можливим обчислити показники точності для груп точок, згрупованих за різними характеристиками.

Це можуть бути, наприклад, типи лісових насаджень (скажімо, тестові ділянки з хвойними чи листяними деревами) або кількість доступних супутників.

У процесі оцінки застосовуються такі метрики як середньоквадратична помилка (RMSE) та середня абсолютна похибка (MAE).

Середньоквадратична похибка (RMSE) дає змогу зрозуміти, наскільки розкидані помилки загалом.

Вона бере до уваги квадрат різниці між кожною точкою та її істинним розташуванням.

Це надає оцінку загальної точності на певній території.

А от середня абсолютна похибка (MAE) створює простіше уявлення.

Вона вказує на середню абсолютну величину відмінностей між фактичними точками та еталонними показниками, що дозволяє легко оцінити розбіжність.[6]

Окрім оцінки коректності окремих точок, ці підходи надають можливість зіставляти між собою різноманітні величини.

Це можуть бути як самі точки, так і типи лісових масивів, або ж різні умови спостереження із супутників, наприклад, кількість доступних супутників в зоні огляду.

#### **1.4 Фактори, що впливають на точність визначення місця розташування за допомогою ГНСС**

Аналізуючи точність ГНСС у лісовій місцевості, необхідно врахувати декілька ключових аспектів, які поділяються на три основні групи:

##### **1. Фактори ГНСС:**

- **PDOP (Погіршення точності позиціонування)** - параметр, що характеризує взаємне розташування супутників відносно приймача в момент вимірювання.
- **HDOP (Погіршення горизонтальної точності)** - індикатор, що демонструє точність визначення координат на площині (широта та довгота); велике значення HDOP сигналізує про меншу точність у горизонтальній площині.
- **Горизонтальна похибка позиціонування (VDOP)** - показник точності визначення координат на горизонтальній площині.
- **VDOP (Vertical Decrease in Precision)** - характеризує точність визначення висоти.

Ключовим аспектом точного ГНСС-вимірювання є кількість доступних супутників: чим більше супутників у зоні видимості, тим точніші результати обчислень.

Відсоток рішень Float-DGPS - це відсоток рішень, отриманих за допомогою Float (без корекції) або DGPS (диференціальне позиціонування), і дозволяє оцінити надійність і точність результатів.

## **2. Фактори довкілля:**

- **Нахил території** – бере до уваги особливості рельєфу місцевості, що суттєво впливають на видимість космічного апарату.

- **ЦМР (цифрова модель рельєфу)** – визначає відстань від поверхні землі до супутника.

Схили, що були визначені на основі цифрової моделі місцевості (ЦММ) з роздільною здатністю 5 метрів, можуть призводити до зниження точності визначення координат, внаслідок перешкод, що виникають при проходженні супутникового сигналу.

## **3. Фактори, на які впливають розташування дерев:**

- Підрахунок дерев довкола кожної локації на відстанях 2, 4, 6, 8 та 10 метрів – чим щільніше дерева розташовані поблизу точки вимірювання, тим важче супутнику "бачити" і тим вірогідніше множинне відбиття сигналу.

- Обчислення середньої дистанції до дерев в конкретному радіусі – ця величина відображає густоту лісового масиву і має прямий вплив на точність ГНСС-визначення в умовах лісу.

Об'єднання всіх цих аспектів дозволяє зробити всебічну оцінку точності визначення місцезнаходження за допомогою ГНСС у лісах.

При цьому береться до уваги не лише технічна специфікація ГНСС, а й особливості навколишнього середовища та щільність лісового покриву.

## 2. Результати

### 2.1 Точність ГНСС у хвойних і листяних лісах

На основі статистичних показників точності, зібраних на всіх дослідних ділянках, результати було згруповано відповідно до типу лісу (соснові та листяні).

Для кожного лісового масиву було обчислено середні показники вертикальної та горизонтальної точності даних ГНСС-вимірювань.

Це дозволило провести аналіз впливу різноманітних чинників на кінцеву точність визначення координат.

Таблиця 3: Співвідношення вертикальної та горизонтальної точності ГНСС-спостережень.

| Тип лісу     | Вертикальна точність<br>(см) | Горизонтальна<br>точність (см) |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| Сосновий ліс | 6–8                          | 2–4                            |
| Листяний ліс | 8–10                         | 4–6                            |

Опис таблиці

Вертикальна точність: відображає середнє відхилення у вимірюванні висоти на конкретній території.

Горизонтальна точність: демонструє середню погрішність у вимірюванні розташування об'єктів на земній поверхні в горизонтальній площині (відносно напрямків північ-південь та схід-захід).

Аналіз даних таблиці вказує, що точність ГНСС-позиціонування вища в середовищі соснових лісів, порівняно з лісами, де переважають листяні породи дерев.

Це, можливо, зумовлено просторішим відкритим простором і менш густим пологом у соснових насадженнях, що сприяє кращому прийому сигналів із супутників.

Отримані нами результати виявляють певні цікаві аспекти точності ГНСС в різних типах лісових масивів.

Ось деталі щодо даних:

#### 1. Точність горизонтального позиціонування:

- У середньому абсолютне відхилення для всіх точок становить 1,63 м, а середньоквадратична похибка (RMS) дорівнює 2,03 м.
- У хвойних лісах спостерігається гірша точність: RMS знижується на 34%, а середня похибка — на 71%.

#### 2. Вертикальна влучність:

Три пункти засвідчують від'ємне відхилення, але ГНСС-спостереження завищують висоту.

У хвойних лісах вертикальна точність була вищою, тоді як у листяних лісах середнє відхилення (середньоквадратична похибка 5,27 м) на 51% поступалося показникам хвойних.[4]

#### 3. Розподіл похибок:

- Перевірка на нормальність виявила, що похибки розподілені майже нормально у більшості сценаріїв.

Винятком була вертикальна похибка у хвойних масивах, яка продемонструвала статистичну значущість відхилення від нормального розподілу.

- Спостереження вказують на близький до нормального розподіл, з додатковою статистично підтвердженою нормальністю ( $p = 0,22$ ).[4]

#### 4. Відмінності в розрізі лісового типу:

- На основі зіставлення двох категорій лісу (хвойні та листяні масиви), з використанням рівня значущості 0,05, було виявлено суттєві розбіжності у точності горизонтального та вертикального вимірювання.

- Аналіз розподілу зміщених точок демонструє зміщення в бік західного та південного напрямків у хвойних лісах, тоді як у листяних спостерігається тенденція зміщення у східному та південно-західному/західному напрямках.

Ці дані виокремлюють критичну роль аналізу лісових різновидів та особливостей ландшафту, коли мова йде про застосування ГНСС для чіткого визначення позиції у лісах.

Крім того, вони засвідчують, що, хоча точність ГНСС і піддається впливу лісового типу та специфіки місцевості, її рівень залишається задовільним навіть у найскладніших лісових умовах.[4]

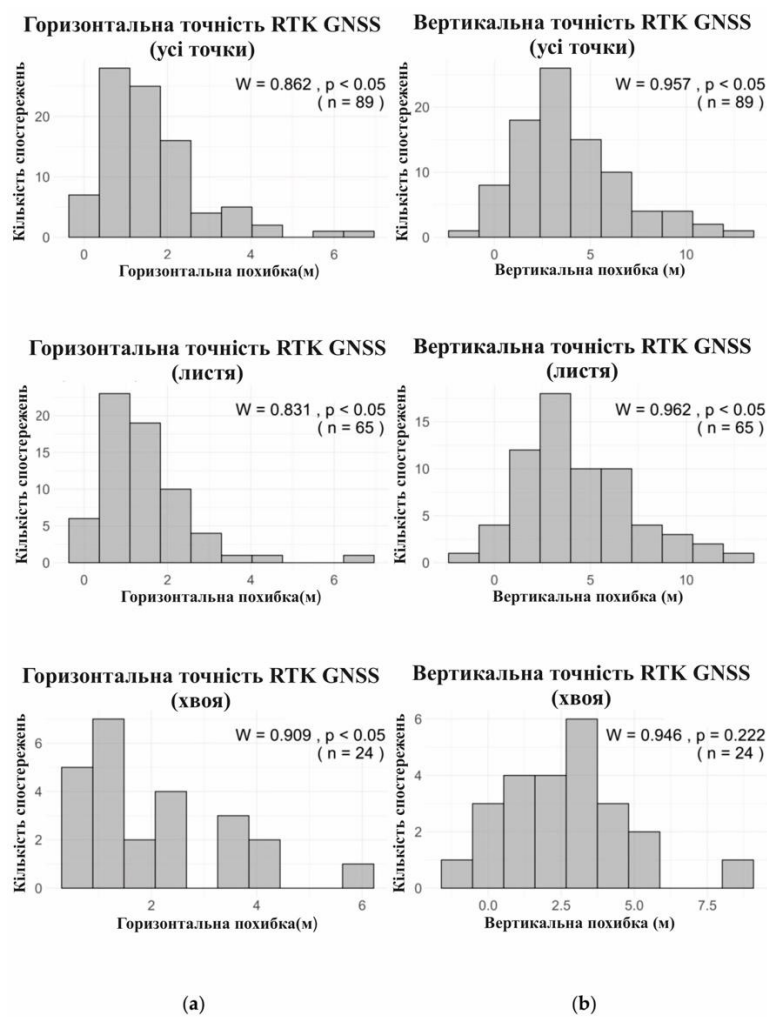


Рисунок 5. Розподіл похибок спостережень ГНСС

На рисунку 5 зображено два графіки, що демонструють порівняння розподілу похибок спостережень ГНСС у хвойних та листяних лісах:

а) Розподіл горизонтальних похибок:

Графік ілюструє різницю у горизонтальній точності вимірювань, характерну для різних типів лісу.

б) Розподіл вертикальних похибок:

Графік відображає відмінності у вертикальній похибці, властиві для різних типів лісових масивів.

Для кожного графіка:

$W$  - це статистика тесту на нормальність, що визначає відповідність похибок нормальному розподілу.

$p$  - рівень значущості статистики  $W$ , котрий демонструє, наскільки суттєво відхилення від нормального розподілу.

$n$  - об'єм вибірки, використаний для формування розподілу похибок.

На представленій ілюстрації відображено взаємозв'язок між точністю ГНСС та лісовим покривом.

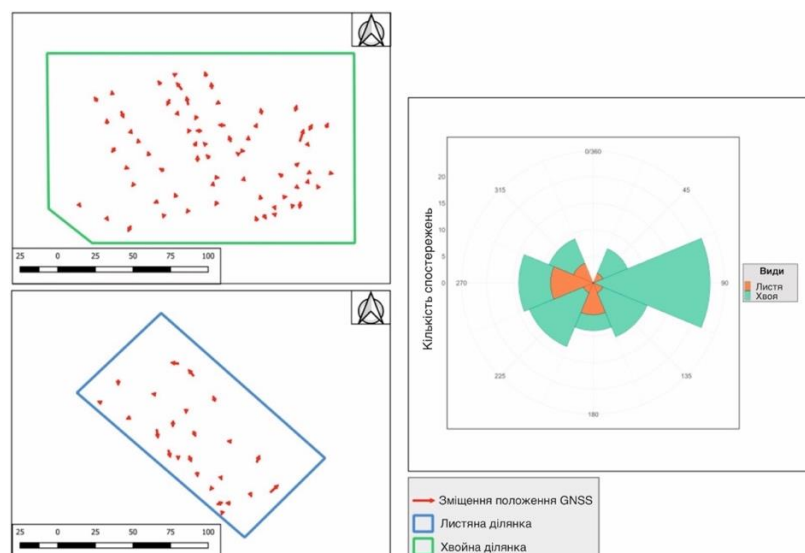


Рисунок 6. Напрямок та величина горизонтального зміщення (похибки) для ГНСС-позицій

## 2.2. Зміни умов функціонування ГНСС під лісовим пологом

Аналіз результатів збору даних ГНСС враховує ключові параметри: PDOP, HDOP, VDOP, кількість видимих супутників, а також тип рішення ГНСС.

Це дає змогу зрозуміти, як точності даних ГНСС корелюють з геометрією розташування супутників та загальними умовами навколишнього середовища.[4]

Таблиця 4: Варіації факторів, пов'язаних з ГНСС

| Фактор   | Середнє | Зміна | Стандартне відхилення | Мінімум | Максимум |
|--|---------|-------|-----------------------|---------|----------|
| <b>Всі спостереження (n = 89)</b>              |         |       |                       |         |          |
| PDOP   | 1.92    | 1.77  | 0.52                  | 1.27    | 3.58     |
| HDOP   | 1.06    | 1.00  | 0.31                  | 0.70    | 2.10     |
| VDOP   | 1.62    | 1.49  | 0.49                  | 1.06    | 3.29     |
| Кількість супутників                           | 13.24   | 13.00 | 2.01                  | 8       | 23       |
| Плаваючі рішення (out of 30)                   | 0.91    | 0.00  | 2.63                  | 0       | 14       |
| <b>Спостереження в хвойному лісі (n = 24)</b>  |         |       |                       |         |          |
| PDOP   | 1.97    | 1.84  | 0.49                  | 1.34    | 3.46     |
| HDOP   | 1.17    | 1.10  | 0.38                  | 0.70    | 2.10     |
| VDOP   | 1.65    | 1.53  | 0.44                  | 1.12    | 3.25     |
| Кількість супутників                           | 13.88   | 13.50 | 2.25                  | 11      | 23       |
| Плаваючі рішення (out of 30)                   | 1.38    | 0.00  | 3.02                  | 0       | 13       |
| <b>Спостереження в листяному лісі (n = 65)</b> |         |       |                       |         |          |
| PDOP   | 1.90    | 1.70  | 0.54                  | 1.27    | 3.58     |
| HDOP   | 1.02    | 0.90  | 0.27                  | 0.70    | 2.00     |
| VDOP   | 1.61    | 1.41  | 0.51                  | 1.06    | 3.29     |
| Кількість супутників                           | 13.00   | 13.00 | 1.87                  | 8       | 16       |
| Плаваючі рішення (out of 30)                   | 0.74    | 0.00  | 2.48                  | 0       | 14       |

Таблиця 4 презентує наступну інформацію:

- PDOP (Розрідження точності позиціонування), HDOP (Розрідження точності за горизонталлю), VDOP (Розрідження точності за вертикаллю) - показник варіації геометрії супутників.

Відображає вплив конфігурації супутників на точність визначення координат.

- Кількість супутників, котрі знаходяться в полі зору, має вирішальне значення і прямо корелює з якістю отриманої інформації про місцезнаходження.

- Типи ГНСС-розв'язків – це дані вимірювань, які поділяються на такі категорії:

- Float – розв'язки, що не мають фіксованого статусу, проте надають інформацію про оцінку позиції.

- DGPS (Диференціальний ГНСС) – розв'язки, які застосовують диференціальні поправки з метою покращення точності.[4,7]

З аналізу отриманих результатів стає зрозуміло, що розв'язок цього завдання не є фіксованим.

Це означає, що дані з кожної ГНСС станції віднесені до категорій Float або DGPS.

Це свідчить про наявність певних перешкод у забезпеченні високої точності визначення положення в лісових умовах, у зв'язку з чим неможливо зафіксувати точне рішення.

Ця інформація може слугувати підґрунтям для подальшого дослідження факторів, що знижують точність ГНСС, та порівняння з іншими можливими варіантами та методиками підвищення точності в лісових масивах.

DOP демонструє картину розподілу супутників на кожному з тестових полігонів; показники DOP скрізь були менше 4 (рис. 7).[4]

Це пояснюється значною кількістю видимих супутників, яка коливалася в середньому від 8 до 13 для обох місцевостей.

Тестування підтвердило близькість умов для ГНСС на обох полігонах, де значення потрапляли в діапазон 0,074 – 0,303 для п'яти досліджених параметрів.

Відносно типу рішення ГНСС: в умовах щільного лісу переважали розв'язки типу DGPS.



Рисунок 7: Зміна специфічних параметрів функціонування ГНСС на території двох дослідних полігонів.

### 2.3. Розміщення перепон навколо місць випробувань

Відстань між місцями проведення тестів та найближчими деревами варіювалася від 0,20 до 9,44 метри, при цьому середній показник склав 2,76 м.

Слід зазначити, що розташування точок було заплановано таким чином, щоб жодне дерево не було ближче ніж 0,5 метри, однак відповідність цій вимозі перевірялася виключно візуально, безпосередньо на місці.

Отже, розташування точок мало забезпечити мінімальну відстань від дерев у 0,5 метра, проте, врахування цього здійснювалось виключно візуально, без використання точних вимірювальних приладів, безпосередньо на місці.[7]

З огляду на це, було зафіксовано, що чотири точки (по парі на кожній з ділянок) виявились розташовані на відстані менше 0,5 метра від стовбурів дерев.

Аналіз кількості дерев у різних радіусах навколо точок, у діапазоні від 2 до 10 метрів з кроком 2 метри, передбачав виключення точок з радіусом 2 метри.

Це було обґрунтовано тим, що в 75% точок спостереження кількість дерев у цьому радіусі коливалась від нуля до одного (інформація міститься в Таблиці 5).[4]

Таблиця 5: Розподіл дерев навколо дослідних точок.

| Радіус визначення (м) | Середня кількість дерев | Мінімальна кількість дерев | Максимальна кількість дерев |
|-----------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 2                     | 0.34                    | 0                          | 4                           |
| 4                     | 1.71                    | 0                          | 5                           |
| 6                     | 4.19                    | 0                          | 11                          |
| 8                     | 7.61                    | 0                          | 16                          |
| 10                    | 11.99                   | 1                          | 25                          |

Фактори, що були проаналізовані у цій роботі, демонструють слабкий кореляційний зв'язок із загальним рівнем точності (вони

пояснюють приблизно чверть - трохи більше чверті – відсотків змінності результатів), і це переважно обумовлено особливостями листяних порід.

Втім, у випадку обмеження дослідження лише точками, що належать до зон, де переважають хвойні дерева, зазначені фактори розкривають понад вісімдесят відсотків варіацій як у площинній, так і у висотній точності.

Точність ГНСС, взявши до уваги стандартне відхилення, яке становить 30 одиниць для кожної конкретної координати, виявляє значущий зв'язок з розглянутими змінними.

Зокрема, близько половини коливань може бути обґрунтовано в сукупності, коли показники доходять до рівня від 86 до 98.[4]

Інші результати дослідження:

1. DOP практично не впливає на точність вимірювань, показуючи незначні зміни;
2. Рельєф місцевості впливає лише на точність вимірювання по вертикалі;
3. Фактори, що враховують розташування дерев (віддаленість до найближчого дерева, їх загальна кількість, середня відстань до дерев різного діаметру), демонструють частковий вплив на точність у хвойних лісових масивах.

Точність результатів ГНСС спостережень характеризується:

- Загалом по всіх площах: PDOP та число супутників значущі для забезпечення горизонтальної та вертикальної точності.

Водночас, тип лісу впливає лише на горизонтальну точність, а крутизна схилу – виключно на вертикальну.

- Стосовно хвойних насаджень: кількість супутників суттєва для горизонтальної точності, проте не впливає на вертикальну.

- Для листяних масивів: PDOP є важливим фактором для досягнення горизонтальної точності, натомість, вплив крутизни схилу визначає вертикальну точність.

## 2.4. Погодження точності позиціонування із показниками ГНСС

Визначення точності позиціонування, яке базується на ГНСС, здебільшого визначається стандартним відхиленням результатів повторних вимірювань однієї й тієї ж точки.

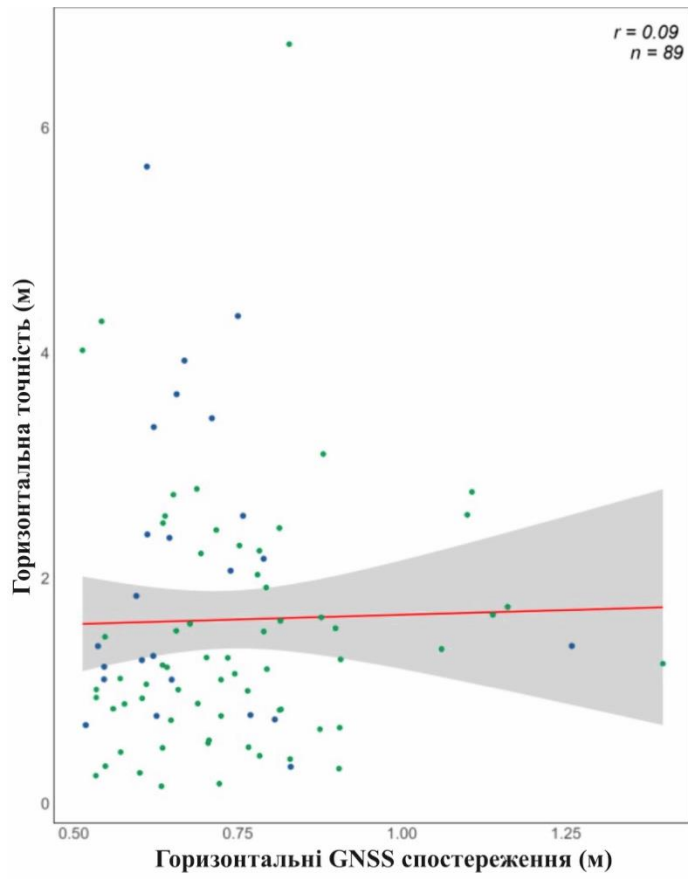
Таким чином, середньоквадратичне відхилення (СКО) координат ГНСС було зіставлене з горизонтальною та вертикальною точністю. Це включає зміщення точки позиціонування та відповідну вертикальну похибку.

Отримані дані вказують на те, що кореляція між похибками виражена дуже незначно, особливо для горизонтального компоненту (див. рис. 8).

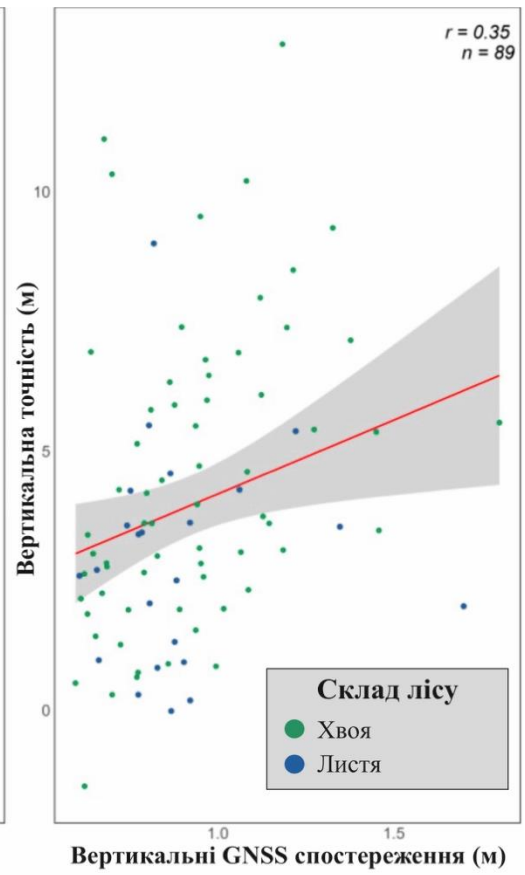
Коефіцієнт кореляції, позначений як  $r$ , дорівнює 0,09 для горизонтальної похибки та 0,35 для вертикальної похибки.

В умовах хвойного ландшафту значення  $r$  для горизонтальної точності становить 0,06, у той час як для вертикальної точності спостерігається значення -0,11.

Водночас, у місцевості з листяною рослинністю значення  $r$  для горизонтальної точності зростає до 0,21, а для вертикальної – сягає 0,46, демонструючи незначний взаємозв'язок між обома показниками точності.[4]



(a)



(b)

Рисунок 8: Взаємозалежність між похибками

### 3. Обробка спостережень

#### 3.1 Точність ГНСС у хвойних і листяних лісах

Як вже було згадано, аббревіатура ГНСС тепер об'єднує дуже багато різних технік, підходів та приладів, що робить об'єктивне порівняння точності між різними науковими роботами складним завданням, особливо враховуючи варіативність у методиках.

Звісно, окремим науковцям вдавалося досягнути сантиметрової точності з використанням РТК навіть під шаром лісу.

Проте, це було реалізовано лише за умови, що приймач вирішував усі неоднозначності, що потребувало значно більше часу спостереження (аж до 6 годин на один пункт), у порівнянні з терміном, виділеним нами у нашому дослідженні.

Точність, що була досягнута в інших дослідженнях, де використовували РТК-ГНСС у схожих лісових середовищах, була суттєво нижчою (середнє квадратичне відхилення сягало 16-20 м).[4,6]

Такий результат можна пояснити тим, що приймачі ГНСС були розташовані на надзвичайно близькій відстані (30 см) від стовбурів дерев.

Водночас, беручи до уваги саме якісні (а не кількісні) підсумки нашої роботи, зроблені висновки варто розглядати в більш широкому контексті.

Хоча прямий вплив на лісові масиви не є ключовим завданням цього аналізу, слід відмітити потенціал РТК-ГНСС досягати сантиметрової точності в умовах відкритого простору.

Наші дані, із середньоквадратичною похибкою (СКП) горизонтального позиціонування в 2,03 метри та середньою абсолютною похибкою 1,63 метри, переконливо свідчать про помітне погіршення функціональності ГНСС в лісовій місцевості.[4]

Щодо вертикальної похибки, отримані результати фіксують зниження точності, яке складає приблизно половину від значення у відкритому середовищі.

Раніше було загальновідомо, що ГНСС показує гірші результати у визначенні висоти, ніж у визначенні положення - точність, як правило, була вдвічі нижчою.

Це сприймалося як загальноприйнятий факт, підкріплений практичним досвідом.

Крім того, виявлено статистично значущі розбіжності у похибках, пов'язані з різним типом лісового покриву.

Це підтверджує частину попередніх досліджень, але не всі їхні висновки.

Варто розуміти, що позначення "хвойний" чи "листяний" для опису лісу – це лише спрощена модель.

Вона не бере до уваги такі параметри, як густина дерев, розбіжність у розмірах стовбурів, різноманіття та вид ґрунтових рослин, а також інші обставини, які мають значний вплив на точність визначення координат ГНСС.

Найбільша горизонтальна точність в листяних масивах пояснюється відсутністю листя під час проведення ГНСС-вимірювань.

Водночас, більш висока вертикальна точність у хвойних насадженнях є менш очевидною.

Можливо, це пов'язано з меншою кількістю зібраних даних у хвойних лісах ( $n = 24$ ), різницею в середньому куті нахилу (у хвойних лісах: 19%, у листяних лісах: 24%), або ж впливом цих двох факторів разом.[4]

### 3.2. Методики визначення координату лісі за допомогою ГНСС,

Існують три види ГНСС-рішень, що вирізняються різною точністю: диференційовані системи навігації та позиціонування (DGPS). Приймач у них збирає сигнали із супутників упродовж часу, достатнього для точнішого визначення положення, використовуючи фазу несучої частоти.

Плаваючі рішення - це рішення з фіксованими координатами, для яких достатньо часу, аби розв'язати цілочисельну неоднозначність, притаманну вимірам фази несучої частоти.

У ході нашого дослідження не виявлено жодного сталого розв'язку, й майже всі зафіксовані дані були класифіковані як рішення DGPS (97% з 2670 результатів – по 30 результатів на кожную точку).

Це може обґрунтовувати порівняно невисоку точність, незважаючи на значну кількість доступних супутників (в середньому 13) та добрі показники PDOP (середній PDOP менше 2).[4]

Це питання потребує подальшого вивчення, адже тривалість періоду стабілізації не була включена до аналізу, але важливо зауважити, що траплялися випадки, коли навіть після підключення ГНСС-приймача до монопода на одну-дві години, стабільні рішення так і не були отримані.

Як уже зазначалося, визначення фази несучої частоти стає складнішим через перебої в сигналі, які не дозволяють коректно вирішувати цілочисельну неоднозначність.

Користувачам ГНСС-систем у лісових масивах слід завжди усвідомлювати: навіть за умови досягнення стабільного рішення задачі, фіксоване рішення може містити неточності.

Це може обумовити більші похибки у подальших, остаточних обчисленнях координат, що зрештою здатне дати гірший результат порівняно з рішеннями, отриманими за допомогою методу "плаваючого" розв'язку або DGPS.

### 3.3. Роль відносних факторів для точності ГНСС

Щодо зовнішніх впливів, ключове відкриття цього аналізу полягає в тому, що довкільні умови, зокрема порода дерев та кут нахилу території, мають набагато сильніший вплив на точність ГНСС, ніж конкретні параметри ГНСС, як-от кількість видимих супутників чи DOP.

Це не є несподіванкою, адже коректність визначення місцезнаходження за допомогою супутників залежить від оточення, в якому здійснюються спостереження.

Загалом, зазначені в нашій роботі чинники достатньою мірою описують більшість неточностей, що трапляються у хвойних лісових масивах (більше 85% варіативності роз'яснюється, як для горизонтальної, так і для вертикальної складової), проте у листяних лісах спостерігається інша картина, де лише від 17% до 29% варіативності залежить від специфічних для ГНСС параметрів, таких як PDOP, HDOP та VDOP, які наочніше розкривають відхилення точності в обох типах місцевостей. [4,6]

Єдиний випадок, коли спостерігається виняток, це точність вимірювань по вертикалі на графіках листя, де вплив розглянутих факторів пояснює тільки 29% розкиду даних.

З цього можна зробити висновок, що доволі значна похибка у визначенні положення по вертикалі на зазначеній ділянці, котра помітно перевищує показники у хвойних лісах, найімовірніше, зумовлена впливом факторів, які поки що не вдалося врахувати, і котрі вимагають проведення подальших досліджень.

Фактори, що стосуються розміщення дерев довкола приймача ГНСС, зазвичай не чинили істотного впливу, особливо на точність за горизонтальною віссю.

Це натякає на те, що інші чинники, які не були враховані в даному аналізі, зокрема, розмір та форма крони дерев, можуть мати значно більший вплив на продуктивність ГНСС, аніж сам факт наявності стовбурів дерев.

### 3.4. Точність розташування ГНСС

Точність визначення координат за допомогою ГНСС є критичною, адже звичайні користувачі, як правило, позбавлені можливості звіряти результати із наземними контрольними точками.

Здебільшого похибки позиціювання недооцінюють, проте точність – це наслідок взаємодії систематичних та випадкових похибок, тому необхідно встановлювати взаємозв'язок між цими чинниками.

Це дає змогу зіставити здобуту відносну точність.

Скажімо, можна застосовувати оцінки точності, розраховані за середньоквадратичним відхиленням координат, отриманих у серії повторних вимірювань, адже вони здатні дати зрозуміле уявлення про точність визначення положення.

Наші дослідження, проте, демонструють слабкий зв'язок між передбачуваними показниками точності та реальною точністю, зокрема, для координат широти та довготи.

Ми вже акцентували увагу на тому, що стандартне відхилення, розраховане для координат, недостатньо добре представляє дійсний рівень точності ГНСС.

Погіршення точності (DOP), як з'ясувалося, виявляє кращу взаємодію з точністю загалом, аніж із окремим розташуванням.

Скажімо, кореляція між PDOP та похибкою по горизонталі мала  $r = 0,09$ , але показник значно збільшився, досягнувши  $0,45$ , коли ми аналізували горизонтальну точність.[4]

Попередні наукові праці також свідчать про те, що PDOP має незначний вплив на точність або взагалі не є її предиктором.

Збільшення кількості космічних апаратів на орбіті сприяє зменшенню значення геометрії супутників як фактора, і труднощі з точністю, скоріше за все, виникатимуть лише в найбільш критичних ситуаціях.

Це вказує на те, що застосовність DOP для відображення реальних характеристик ГНСС є обмеженою.

## Висновки

Оскільки ГНСС-технології невинно вдосконалюються, питання оцінки їхньої ефективності не втрачає своєї актуальності й важливості.

Мета цієї бакалаврської роботи полягала в тому, щоб провести оцінку функціональності ГНСС-приймачів в умовах, що ускладнені особливостями рельєфу, а саме на місцевості з крутими схилами та щільним лісовим покривом.

Робочий план для польових умов передбачав короткі відрізки спостережень – по 30 секунд на кожную точку.

Для виконання поставленої задачі використовувався метод RTK, що базується на корекціях, які надходили від стаціонарних базових станцій.

Ці станції імітували реальні умови роботи з ГНСС обладнанням в лісовій місцевості.

Результати дослідження продемонстрували, що застосування даного методу дозволяє досягти вражаючої точності, варіюючи від 1 метра до вражаючих 1 сантиметра, навіть у випадках, коли супутникові сигнали зазнають впливу рослинного покриву.

Було встановлено статистично вагомі розбіжності у значеннях горизонтальних та вертикальних похибок при порівнянні результатів, отриманих у хвойних та листяних лісових масивах.

Однак, задля глибшого розуміння різниці в функціонуванні ГНСС систем, слід глибше проаналізувати параметри лісової структури.

Наше дослідження виявляє, що в умовах щільного лісового масиву фактори навколишнього середовища здатні значно сильніше впливати на точність, аніж конкретні показники ГНСС, наприклад, число доступних супутників та PDOP.

На даний момент ключовою проблемою для супутникового позиціювання в лісах є мінімізація ефекту багатопроменевого розповсюдження сигналу, і це активно досліджується.

Загалом, застосування RTK-ГНСС приймачів та виправлень від національних і регіональних мереж забезпечує можливість оперативно визначати місцезнаходження з прийнятною точністю навіть під шатром лісу, відповідно до конкретних потреб.

Особливо це актуально, якщо точність висоти не має визначального значення.

Системи ГНСС відкривають широкі перспективи застосування, що особливо важливо при розробці антен, різноманітних пристроїв та програмного забезпечення. Необхідно постійно аналізувати та оцінювати потенціал цієї технології.

Ще одним ключовим напрямом досліджень є аналіз можливостей сучасних портативних RTK-пристроїв, зокрема тих, що інтегровані у смартфони.

Йдеться про збільшення часу спостереження для досягнення порівнянної якості роботи з масивнішим геодезичним обладнанням в умовах лісу.

## 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. Cățeanu, M.; Moroianu, M.A. Performance Evaluation of Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System with Survey-Grade Receivers and Short Observation Times in Forested Areas. *Sensors* **2024**, *24*, 6404. <https://doi.org/10.3390/s24196404>
5. Д'Еон, С.П. Вплив лісового пологу на сигнали GPS на двох висотах антени. Північ. Журнал прикладних досліджень. 1996, 13, 89–91. [CrossRef]
6. Нессет, Е. Точність комбінованого визначення псевдодальності та диференціала фази несучої GPS під лісовим пологом. *Can. J. For. Res.* 1999, 29, 547–553. [CrossRef]
7. Беттінгер, П.; Фей, С. Річний досвід роботи з GPS-приймачем рекреаційного класу. *Math. Comput. Nat. Resour. Sci.* 2010, 2, 153–160.
8. Бастос, А.С.; Хасегава, Х. Поведінка ймовірності переривання сигналу GPS під пологами дерев у різних лісових умовах. *Eur. J. Remote Sens.* 2013, 46, 613–622. [CrossRef]

## **БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА**

Тема бакалаврської роботи:

« Оцінка ефективності кінематичного GNSS-позиціонування в реальному часі для аналізу земельних ресурсів ».

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

\_\_\_\_\_ рік  
(дата)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)