

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Інститут архітектури та будівництва

«ІФНТУНГ-ДонНАБА»

УДК 332.72

(індекс)

Семанів Андрій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

ПОТЕНЦІАЛ RTK GNSS ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗНІМАНЬ В
ЛІСОВІЙ МІСЦЕВОСТІ НА ПРИКЛАДІ ЛІСІВ
ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ.

(назва роботи)

Землеустрій та кадастр

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Андрій СЕМАНІВ, студент групи ГЗЗм-24-1

(підпис, ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.т.н. доцент Олена КРАВЕЦЬ

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

проф.

Микола ПРИХОДЬКО

(посада)

(підпис)

(дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

Проф.

Микола ПРИХОДЬКО

(посада)

(підпис)

(дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

Івано-Франківськ
2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут **архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»**

Кафедра **геодезії та землеустрою**

Освітній рівень **магістр**

Спеціальність **193 Геодезія та землеустрій**

Освітня програма **Землеустрій та кадастр**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ___ " _____ р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Семаніву Андрію Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ПОТЕНЦІАЛ RTK GNSS ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗНІМАНЬ В ЛІСОВІЙ МІСЦЕВОСТІ НА ПРИКЛАДІ ЛІСІВ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ»

керівник роботи к.т.н. доцент Олена КРАВЕЦЬ

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

затверджена наказом вищого навчального закладу від «28» листопада 2025 року
№743/7

2. Строк подання студентом роботи 23 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики, статистичні дані

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

1. Теоретичні основи та аналіз сучасних GNSS технологій у лісовому господарстві.
2. Методика дослідження та характеристика об'єкта.
3. Експериментальні дослідження та оцінка ефективності RTK GNSS.

5. Дата видачі завдання: 02.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1 | <i>Отримання завдання на виконання магістерської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури по темі</i> | <i>02.10.25-05.10.25</i> | |
| 2 | <i>Складання попереднього плану та змісту магістерської роботи</i> | <i>06.10.25-12.10.25</i> | |
| 3 | <i>Теоретичні основи та аналіз сучасних GNSS технологій у лісовому господарстві</i> | <i>13.10.25-02.11.25</i> | |
| 4 | <i>Методика дослідження та характеристика об'єкта</i> | <i>03.11.25-21.11.25</i> | |
| 5 | <i>Експериментальні дослідження та оцінка ефективності RTK GNSS</i> | <i>22.11.25-05.12.25</i> | |
| 6 | <i>Складання висновків</i> | <i>06.12.25-10.12.25</i> | |
| 7 | <i>Оформлення магістерської роботи</i> | <i>11.12.25-22.12.25</i> | |

Студент _____ **Андрій СЕМАНІВ**
(підпис) (ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи _____ **к.т.н, доцент Олена КРАВЕЦЬ**
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 82 сторінок тексту, 4 таблиць, 8 рисунків, використано 12 джерел інформації.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процеси геодезичних знімачь у лісовій місцевості західного регіону України з використанням GNSS технологій.

Метою роботи є оцінка потенціалу та ефективності застосування RTK GNSS технологій для підвищення точності й продуктивності геодезичних та лісовпорядних робіт в умовах лісового пологу.

Досягнення мети здійснено шляхом аналізу сучасних GNSS і традиційних методів зйомок, виконання експериментальних RTK вимірювань на ділянках з різною густотою лісової рослинності та рельєфом, а також камеральної обробки і порівняльного аналізу результатів.

У роботі отримано результати щодо залежності точності RTK позиціонування від ступеня затінення, кількості супутників і умов рельєфу. Наукова новизна полягає у визначенні критичних показників лісового пологу, за яких RTK GNSS зберігає придатну для лісовпорядкування точність, та у формуванні практичних рекомендацій щодо оптимальних умов застосування.

Результати можуть бути впроваджені у практику геодезичних і лісогосподарських підприємств для підвищення ефективності знімачь.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: RTK GNSS, ГЕОДЕЗИЧНІ ЗНІМАННЯ, ЛІСОВА МІСЦЕВІСТЬ, ТОЧНІСТЬ ПОЗИЦІОНУВАННЯ, ЛІСОВПОРЯДКУВАННЯ, GNSS ТЕХНОЛОГІЇ, ЗАХІДНИЙ РЕГІОН УКРАЇНИ.

ABSTRACT

Explanatory and Calculation Report: 82 pages of text, 4 tables, 8 figures, 12 information sources used.

The object of the master's thesis research is the processes of geodetic surveying in forested areas of the western region of Ukraine using GNSS technologies.

The aim of the study is to assess the potential and effectiveness of applying RTK GNSS technologies to improve the accuracy and productivity of geodetic and forest inventory works under forest canopy conditions.

The achievement of this aim was ensured through the analysis of modern GNSS and traditional surveying methods, the execution of experimental RTK measurements on sites with different forest canopy densities and terrain conditions, as well as through office processing and comparative analysis of the results.

The study obtained results concerning the dependence of RTK positioning accuracy on the degree of signal obstruction by the forest canopy, the number of tracked satellites, and terrain conditions. The scientific novelty lies in determining the critical forest canopy parameters under which RTK GNSS maintains accuracy acceptable for forest inventory purposes, and in developing practical recommendations regarding optimal conditions for its application.

The results can be implemented in the practice of geodetic and forestry enterprises to increase the efficiency of surveying operations.

KEYWORDS: RTK GNSS, GEODETIC SURVEYING, FORESTED AREAS, POSITIONING ACCURACY, FOREST INVENTORY, GNSS TECHNOLOGIES, WESTERN REGION OF UKRAINE

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП..... | 8 |
| 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ GNSS ТЕХНОЛОГІЙ У ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ..... | 11 |
| 1.1 Огляд методів та засобів геодезичних зйомок у лісовій місцевості | 11 |
| 1.2 Принципи роботи та функціональні можливості технології RTK GNSS | 15 |
| 1.3 Фактори, що знижують точність GNSS вимірювань під лісовою рослинністю..... | 19 |
| 1.4 Аналіз вітчизняного та світового досвіду застосування RTK для лісовпорядних робіт | 23 |
| Висновки до розділу 1 | 28 |
| 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА..... | 30 |
| 2.1 Вибір та обґрунтування ділянок дослідження | 30 |
| 2.2 Методика проведення польових вимірювань..... | 34 |
| 2.3 Методика камеральної обробки та порівняльного аналізу даних..... | 39 |
| Висновки до розділу 2 | 43 |
| 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ RTK GNSS | 45 |
| 3.1. Результати RTK GNSS зйомок на тестових ділянках | 45 |
| 3.1.1 Аналіз точності вимірювань | 49 |
| 3.1.2 Залежність похибки від затемнення крон | 52 |
| 3.1.3 Взаємозв'язок затемнення та параметрів супутникової констеляції..... | 54 |
| 3.1.4 Вплив рельєфу на точність вимірювань..... | 55 |
| 3.1.5 Статистична повторюваність результатів | 56 |
| 3.1.6 Висновки щодо придатності методу | 57 |
| 3.2. Порівняльний аналіз продуктивності праці | 58 |
| 3.2.1 Часові витрати при традиційній тахеометричній зйомці..... | 58 |
| 3.2.2 Часові витрати при RTK GNSS зйомці | 59 |
| 3.2.3 Порівняльна оцінка продуктивності..... | 61 |
| 3.2.4 Розрахунок економічної ефективності | 62 |
| 3.3. Визначення оптимальних умов та обмежень застосування RTK GNSS..... | 64 |
| 3.3.1 Зони придатності RTK методу | 65 |
| 3.3.2 Критичний поріг застосовності | 66 |
| 3.3.3 Рекомендації для забезпечення надійності вимірювань | 67 |
| 3.3.4 Контроль якості та організаційні заходи | 69 |
| 3.3.5 Перспективи розвитку технології | 71 |
| Висновки до розділу 3 | 72 |
| Висновки | 75 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 80 |
| БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА | 82 |

ВСТУП

Сучасний розвиток лісового господарства України відбувається в умовах зростання вимог до точності просторових даних, оперативності виконання знімальних робіт та цифровізації процесів обліку, планування і моніторингу лісових ресурсів. Геопросторова інформація є базовою складовою лісовпорядкування, інвентаризації лісів, контролю використання земель лісового фонду та прийняття управлінських рішень. Особливо актуальною ця проблема є для лісів західного регіону України, які характеризуються складним рельєфом, значною залісненістю території, різновіковою структурою насаджень та високим ступенем зімкнення крон, що ускладнює виконання геодезичних знімачь.

Традиційні геодезичні методи, зокрема теодолітні та тахеометричні зйомки, забезпечують високу точність визначення координат, однак відзначаються значною трудомісткістю, потребою у прокладанні знімальних ходів, створенні густої опорної мережі та значними часовими витратами. У зв'язку з цим у лісовому господарстві дедалі ширше впроваджуються супутникові навігаційні технології GNSS, які дозволяють суттєво підвищити продуктивність праці та скоротити тривалість польових робіт. Разом із тим використання GNSS у лісовій місцевості супроводжується низкою проблем, пов'язаних із затіненням супутникових сигналів деревною рослинністю, багатопрореневістю, зменшенням кількості видимих супутників та погіршенням геометрії супутникової констеляції.

Особливий інтерес у цьому контексті становить технологія RTK GNSS, яка забезпечує отримання координат у режимі реального часу з сантиметровою та міліметровою точністю. У відкритій місцевості ефективність RTK технології є добре дослідженою та підтвердженою численними науковими роботами. Значний внесок у розвиток теорії та практики супутникових геодезичних вимірювань зробили вітчизняні та зарубіжні науковці, зокрема роботи,

присвячені методам високоточного GNSS позиціонування, аналізу впливу іоносфери, тропосфери та геометрії супутникової констеляції на точність координатних визначень. Водночас питання застосування RTK GNSS у складних умовах лісової місцевості, особливо з урахуванням різного ступеня затінення крон, видового складу деревостанів та рельєфу, залишаються недостатньо вивченими або мають суперечливі результати.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень зосереджені або на відкритих територіях, або на міських умовах, тоді як систематичні експериментальні дослідження точності RTK GNSS у лісових масивах, характерних для західного регіону України, є обмеженими. Недостатньо опрацьованими залишаються питання визначення критичних показників затінення, за яких RTK вимірювання втрачають необхідну точність, оцінки просторової варіабельності похибок у межах окремих ділянок, а також порівняльної економічної ефективності RTK технології відносно традиційних методів геодезичних знімів у лісовому господарстві. Саме ці аспекти формують наукову проблему дослідження та обґрунтовують вибір теми магістерської роботи.

Метою магістерської роботи є оцінка потенціалу та ефективності застосування RTK GNSS технологій для виконання геодезичних знімів у лісовій місцевості на прикладі лісів західного регіону України з урахуванням впливу лісової рослинності та рельєфу на точність і надійність координатних визначень.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань, які включають аналіз сучасних геодезичних методів знімів у лісовій місцевості, дослідження принципів роботи RTK GNSS технології, вивчення факторів, що знижують точність GNSS вимірювань під лісовим пологом, проведення експериментальних RTK знімів на тестових ділянках з різним ступенем затінення, оцінку точності та

стабільності координатних визначень, порівняльний аналіз продуктивності праці та економічної ефективності RTK зйомки, а також визначення оптимальних умов і обмежень застосування RTK GNSS у лісовому господарстві.

Об'єктом дослідження є процес виконання геодезичних знімків у лісовій місцевості. Предметом дослідження є точність, надійність та ефективність RTK GNSS вимірювань в умовах різного ступеня затінення крон деревостанів і складного рельєфу.

Методологічну основу дослідження становлять методи супутникової геодезії, математичної статистики, порівняльного аналізу, експериментальні методи польових вимірювань, а також методи камеральної обробки та візуалізації просторових даних. У процесі дослідження застосовувалися сучасні GNSS приймачі та програмні засоби для обробки супутникових спостережень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексній оцінці впливу ступеня затінення лісового пологів та рельєфу на точність RTK GNSS позиціонування, встановленні критичних значень затінення, за яких відбувається різка деградація точності, а також у визначенні закономірностей просторового розподілу похибок у межах лісових ділянок західного регіону України.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів та розроблених рекомендацій під час виконання лісовпорядних, інвентаризаційних та топографо-геодезичних робіт у лісовій місцевості, а також при виборі оптимальної технології знімання залежно від умов місцевості.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ GNSS ТЕХНОЛОГІЙ У ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ

1.1 Огляд методів та засобів геодезичних зйомок у лісовій місцевості

Геодезичне забезпечення лісовпорядних робіт історично розвивалося від примітивних засобів визначення меж лісових масивів до сучасних високоточних технологій дистанційного зондування та супутникової навігації. Еволюція методів геодезичних вимірювань у лісовій місцевості відображає загальний технологічний прогрес у галузі геоінформатики та відповідає зростаючим вимогам щодо точності, оперативності та економічної ефективності лісовпорядкування. Специфіка лісових територій як об'єктів геодезичних зйомок полягає у складній морфології рельєфу, обмеженій видимості через деревну та чагарникову рослинність, утрудненому доступі до віддалених ділянок та необхідності мінімізації впливу на лісові екосистеми під час проведення вимірювань.

Традиційні методи геодезичних зйомок у лісовому господарстві базувалися переважно на використанні теодолітів, нівелірів та рулеток для створення планово-висотної основи лісовпорядних планів. Теодолітні ходи прокладалися вздовж лісових квартальних просік, визначаючи положення квартальних стовпів та інших межових знаків. Однак цей підхід характеризується високою трудомісткістю, значними часовими витратами та обмеженою точністю через накопичення систематичних похибок на великих відстанях. Прокладання теодолітних ходів у густих лісових масивах вимагає розчищення візирних коридорів, що призводить до порушення лісової підстилки та створює умови для ерозійних процесів. Крім того, традиційні методи не забезпечують прив'язки вимірювань до єдиної загальнодержавної системи координат без додаткових геодезичних зв'язків з опорною мережею.

Розвиток електронних тахеометрів у другій половині двадцятого століття суттєво підвищив продуктивність геодезичних робіт у лісовому господарстві. Електронні відстанеміри дозволили автоматизувати процес вимірювання довжин ліній та горизонтальних кутів, забезпечивши одночасне визначення планового та висотного положення точок місцевості. Сучасні електронні тахеометри оснащені вбудованими обчислювальними модулями, які здійснюють первинну обробку даних безпосередньо в польових умовах, зменшуючи ймовірність помилок при камеральній обробці. Безвідбивальні електронні тахеометри розширили можливості зйомки у важкодоступних ділянках лісу, дозволяючи вимірювати відстані без встановлення відбивача на об'єкті спостереження. Проте ефективність тахеометричної зйомки у лісовій місцевості обмежується необхідністю прямої видимості між інструментом та об'єктом вимірювання, що у густих деревостанах часто неможливо забезпечити без значних організаційних зусиль.

Револьюційний вплив на методологію геодезичних робіт у лісовому господарстві справив розвиток глобальних навігаційних супутникових систем. Технологія GNSS забезпечила принципово новий підхід до визначення координат, заснований на вимірюванні псевдовіддалей від приймача до супутників із відомими орбітальними параметрами. Перші застосування GPS у лісовпорядкуванні датуються початком дев'яностих років минулого століття, коли точність автономних GPS вимірювань становила десятки метрів. Впровадження диференційних методів спостережень, зокрема технології DGPS, дозволило підвищити точність до метрового рівня, що виявилось достатнім для багатьох завдань лісової таксації та інвентаризації. Основною перевагою GNSS технологій стала можливість отримання абсолютних координат у загальнодержавній системі координат без необхідності прокладання геодезичних ходів від пунктів опорної мережі [1].

Розвиток диференційних методів GNSS вимірювань призвів до появи кінематичних режимів спостережень у реальному часі, відомих як RTK.

Технологія RTK базується на використанні двох приймачів: базової станції, встановленої на пункті з відомими координатами, та рухомого приймача, який здійснює вимірювання у польових умовах. Базова станція обчислює поправки до вимірювань псевдовіддалей, враховуючи різницю між вимірним та теоретичним положенням супутників, та передає ці поправки рухомому приймачу через радіоканал або мобільний інтернет. Застосування фазових вимірювань несучої частоти супутникового сигналу замість кодових псевдовіддалей дозволяє досягти сантиметрової точності визначення координат після розв'язання неоднозначностей фазових вимірювань. У лісовому господарстві RTK технологія знайшла застосування для визначення координат межових знаків лісових кварталів, знімання лісовозних доріг, створення цифрових моделей рельєфу лісових територій та моніторингу лісопатологічних процесів.

Паралельно з розвитком GNSS технологій відбувалося впровадження методів дистанційного зондування у лісове господарство. Аерофотозйомка традиційно використовувалася для створення планово-картографічних матеріалів лісовпорядкування, однак обмежена просторова роздільність та відсутність інформації про вертикальну структуру лісових насаджень знижували аналітичний потенціал цього методу. Застосування лазерного сканування з повітряних носіїв відкрило нові можливості для тривимірного моделювання лісових екосистем. Технологія LiDAR базується на вимірюванні часу проходження імпульсного лазерного випромінювання від джерела до об'єкта та назад до приймача, що дозволяє визначити відстань до поверхні з високою точністю. Особливістю лазерного сканування лісових територій є здатність лазерного променя проникати через просвіти в кронах дерев та реєструвати множинні відбиття від різних ярусів рослинності та поверхні ґрунту.

Інтеграція даних LiDAR з результатами GNSS вимірювань дозволяє створювати високоточні цифрові моделі місцевості лісових територій, які

враховують як мікрорельєф поверхні, так і морфологічні характеристики деревостанів. Обробка хмар точок лазерного сканування методами класифікації дозволяє розділити відбиття від рослинності та земної поверхні, побудувати цифрові моделі висот деревостанів, оцінити запаси деревини на корені та проаналізувати структурну неоднорідність лісових екосистем. Однак високі економічні витрати на проведення аерознімання з використанням LiDAR обмежують масштаби застосування цієї технології переважно великими лісогосподарськими підприємствами та науково-дослідними проектами національного рівня.

Розвиток безпілотних літальних апаратів створив передумови для застосування фотограмметричних методів зйомки у лісовому господарстві на якісно новому рівні. БПЛА оснащені цифровими камерами високої роздільності та GNSS приймачами для визначення координат точок фотографування, що дозволяє створювати ортофотоплани та тривимірні моделі лісових масивів з просторовою роздільністю до кількох сантиметрів. Фотограмметрична обробка знімків, отриманих з БПЛА, здійснюється методами автоматизованої кореляції зображень, які дозволяють побудувати щільні хмари точок поверхні аналогічно до результатів лазерного сканування. Переваги БПЛА включають оперативність проведення зйомки, можливість повторних обльотів для моніторингу динаміки лісових процесів та порівняно низьку вартість отримання даних. Обмеженням застосування БПЛА у лісовому господарстві є необхідність виконання польотів у сприятливих метеорологічних умовах та законодавчі обмеження на використання повітряного простору.

Сучасна практика геодезичного забезпечення лісовпорядних робіт характеризується комплексним підходом, який поєднує традиційні та інноваційні методи вимірювань залежно від специфіки завдання, доступних ресурсів та вимог до точності результатів. Для створення планово-висотної основи лісовпорядкування та визначення координат межових знаків найбільш ефективним виявляється застосування RTK GNSS, що забезпечує сантиметрову

точність при мінімальних часових витратах. Таксаційні роботи та дешифрування матеріалів дистанційного зондування здійснюються на основі ортофотопланів, створених за результатами аерофотозйомки або знімання з БПЛА. Моніторинг лісопатологічних процесів, оцінка наслідків стихійних лих та контроль незаконних рубок реалізуються шляхом аналізу часових серій супутникових знімків середньої та високої роздільності.

1.2 Принципи роботи та функціональні можливості технології RTK GNSS

Технологія кінематики реального часу є найточнішим методом диференційних супутникових вимірювань, який забезпечує визначення координат рухомого приймача з сантиметровою точністю протягом кількох секунд після ініціалізації. Теоретичні основи RTK базуються на використанні фазових вимірювань несучої частоти супутникових сигналів та передачі коригуючих поправок від базової станції до рухомого приймача через канали зв'язку у реальному часі. Фізична сутність методу полягає у вимірюванні різниці фаз несучого коливання супутникового сигналу між моментом випромінювання із супутника та моментом прийому антеною приймача. Оскільки довжина хвилі несучої частоти супутникових систем GPS та ГЛОНАСС становить близько дев'ятнадцяти сантиметрів, теоретична точність фазових вимірювань досягає міліметрового рівня за умови коректного визначення цілого числа довжин хвиль у вимірюваній псевдовіддалі [2].

Основною проблемою фазових вимірювань є необхідність розв'язання неоднозначностей, тобто визначення цілочисельної кількості довжин хвиль між супутником та приймачем на момент початку спостережень. Ця задача вирішується шляхом статистичного аналізу серії послідовних вимірювань із використанням даних від кількох супутників одночасно. Алгоритми розв'язання неоднозначностей базуються на методі найменших квадратів з накладанням додаткової умови цілочисельності невідомих параметрів. Найбільш поширеним

підходом є метод LAMBDA, який забезпечує ефективний пошук оптимального набору цілочисельних значень неоднозначностей у багатовимірному просторі параметрів. Після успішного розв'язання неоднозначностей приймач переходить у режим фіксованого рішення, який характеризується стабільною сантиметровою точністю визначення координат.

Архітектура RTK системи включає три основні компоненти: базову станцію, рухомий приймач та канал передачі коригуючої інформації. Базова станція встановлюється на пункті геодезичної мережі з точно відомими координатами або здійснює автономне визначення координат методом тривалих статичних спостережень. Геодезична прив'язка базової станції є критично важливою для забезпечення абсолютної точності вимірювань рухомого приймача, оскільки будь-які похибки координат базової станції безпосередньо транслюються на результати визначення положення рухомого приймача. Базова станція безперервно відстежує супутникові сигнали, обчислює поправки до фазових та кодових вимірювань, враховуючи різницю між теоретичним та вимірним положенням супутників, та формує коригуючу інформацію у стандартизованому форматі RTCM. Передача поправок здійснюється через радіомодеми у діапазоні УКХ, мобільний інтернет з використанням протоколу NTRIP або супутникові канали зв'язку залежно від конфігурації системи та географічних умов роботи [3].

Рухомий приймач отримує коригуючу інформацію від базової станції та застосовує ці поправки до власних вимірювань супутникових сигналів, обчислюючи вектор базової лінії між антенами базової та рухомої станцій. Координати рухомого приймача визначаються як сума відомих координат базової станції та компонентів вектора базової лінії. Обчислення координат здійснюється у декілька етапів: спочатку формується математична модель фазових спостережень для усіх видимих супутників, потім розв'язуються неоднозначності фазових вимірювань методами цілочисельного оцінювання, після чого обчислюються компоненти вектора базової лінії та координати

рухомого приймача з оцінкою їх точності. Алгоритми обробки реалізують кальманівську фільтрацію для оптимального оцінювання координат у динамічному режимі, що дозволяє згладжувати випадкові флуктуації вимірювань та підвищувати стабільність рішення.

Функціональні можливості сучасних RTK систем значно розширені порівняно з базовою конфігурацією завдяки інтеграції сигналів множинних супутникових констеляцій та впровадженню технологій мережевого RTK. Одночасне використання супутників GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou збільшує кількість видимих супутників у будь-який момент часу, що особливо важливо для роботи у складних умовах лісової місцевості з обмеженою видимістю небосхилу. Множинна констеляція прискорює процес розв'язання неоднозначностей, підвищує надійність фіксованого рішення та забезпечує продовження коректної роботи навіть при частковому екрануванні супутникового сигналу рослинністю. Сучасні приймачі здатні відстежувати супутникові сигнали на кількох частотах одночасно, що дозволяє ефективно компенсувати вплив іоносферних затримок та підвищити стійкість до багатопробеневого поширення сигналу.

Мережева технологія RTK передбачає використання мережі перманентних базових станцій, розташованих на відстані п'ятдесяти-сімдесяти кілометрів одна від одної, замість однієї локальної базової станції. Обчислювальний центр мережі збирає дані спостережень від усіх базових станцій, моделює просторовий розподіл атмосферних похибок та обчислює індивідуалізовані поправки для конкретного положення рухомого приймача. Мережевий підхід дозволяє врахувати регіональні варіації іоносферних та тропосферних затримок супутникових сигналів, які не можуть бути коректно змодельовані у класичній RTK з однією базовою станцією на великих відстанях. Концепції мережевого RTK включають кілька технічних реалізацій: віртуальна референтна станція генерує синтетичні спостереження для точки, близької до рухомого приймача; метод площинних коригувань передає

параметри просторової моделі атмосферних похибок; метод головної станції використовує дані однієї базової станції як основні з додатковими поправками від сусідніх станцій.

Точність RTK вимірювань залежить від численних факторів, включаючи відстань між базовою та рухомою станціями, стан іоносфери, геометричне розташування супутників та наявність перешкод для проходження супутникових сигналів. За ідеальних умов спостережень горизонтальна точність визначення координат становить від одного до двох сантиметрів при стандартному відхиленні, вертикальна точність зазвичай у півтора-два рази нижча і становить два-три сантиметри. Збільшення довжини базової лінії призводить до зростання похибок через неповну компенсацію атмосферних затримок супутникових сигналів. Диференційні атмосферні похибки зростають приблизно пропорційно відстані зі швидкістю один міліметр на кілометр для іоносферних затримок та близько п'яти міліметрів на десять кілометрів для тропосферних затримок. Практична межа застосування класичної RTK технології становить близько двадцяти кілометрів, після чого похибки атмосферних затримок починають суттєво впливати на надійність розв'язання неоднозначностей та стабільність координатного рішення.

Застосування RTK технології у лісовому господарстві охоплює широкий спектр завдань від створення планово-висотної основи лісовпорядних планів до моніторингу санітарного стану лісових насаджень. Визначення координат межових знаків лісових кварталів та виділів методом RTK забезпечує юридично значиму точність меж землекористування та дозволяє створювати актуальну кадастрову документацію. Знімання лісовозних доріг, трелювальних волоків та зон концентрації лісосічних робіт здійснюється шляхом кінематичної RTK зйомки з записом траєкторії руху приймача. Створення цифрових моделей рельєфу лісових територій базується на визначенні висотних відміток характерних точок місцевості методом RTK з подальшою інтерполяцією поверхні у геоінформаційних системах. Моніторинг лісопатологічних процесів

включає періодичне визначення координат дерев, уражених шкідниками або хворобами, що дозволяє аналізувати динаміку поширення патологічних явищ та оптимізувати заходи захисту лісу.

1.3 Фактори, що знижують точність GNSS вимірювань під лісовою рослинністю

Лісова рослинність створює специфічне середовище поширення електромагнітних хвиль, яке суттєво відрізняється від умов відкритої місцевості та призводить до значної деградації точності та надійності GNSS вимірювань. Фізичні процеси взаємодії супутникових сигналів з елементами лісової екосистеми включають послаблення потужності сигналу через поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання деревною та листковою масою, багатопроменеве поширення внаслідок відбиття сигналу від стовбурів дерев та поверхні ґрунту, дифракційні ефекти на краях крон дерев та повне екранування сигналів від супутників, розташованих у напрямках із щільною рослинністю. Сукупність цих факторів призводить до зниження кількості супутників, сигнали яких можуть бути прийняті приймачем, погіршення геометрії супутникової констеляції, збільшення рівня шумів фазових та кодових вимірювань, зростання ймовірності помилкового розв'язання неоднозначностей та втрати фіксованого рішення RTK.

Послаблення супутникового сигналу під лісовою рослинністю залежить від множини характеристик деревостану, включаючи породний склад, вік насаджень, повноту деревостану, фенологічний стан рослинності та вологість деревної маси. Листяні породи дерев характеризуються сезонною мінливістю прозорості крон для радіохвиль: у безлистяний період послаблення сигналу мінімальне та становить кілька децибелів, тоді як влітку ослаблення може досягати п'ятнадцяти-двадцяти децибелів залежно від густоти листкового покриву. Хвойні породи забезпечують відносно стабільний рівень послаблення протягом року, однак загальна величина ослаблення залежить від щільності

крон та структури хвої. Молоді насадження з невеликою висотою дерев та розрідженими кронами впливають на поширення супутникових сигналів менше, ніж стиглі деревостани з щільно зімкнутими кронами та розвинутою структурою гілок [4].

Вологість деревної маси істотно впливає на ступінь послаблення електромагнітного випромінювання через діелектричні властивості води, яка інтенсивно поглинає радіохвилі у діапазоні частот GNSS сигналів. Після атмосферних опадів ослаблення супутникових сигналів під лісовою рослинністю зростає на кілька децибелів порівняно з сухими умовами, що може призводити до повної втрати сигналів від супутників, розташованих під малими кутами над горизонтом. Сезонні зміни вологості деревної маси пов'язані з фізіологічними процесами транспірації та сокоруху, що обумовлює добову та сезонну варіабельність умов поширення супутникових сигналів навіть за відсутності атмосферних опадів. Дослідження показали, що ослаблення сигналу у хвойних лісах може варіювати від десяти до двадцяти п'яти децибелів залежно від вологості деревної маси та кута нахилу траєкторії поширення сигналу відносно горизонту.

Багатопроменеве поширення супутникових сигналів у лісовій місцевості виникає внаслідок відбиття радіохвиль від стовбурів дерев, великих гілок та поверхні ґрунту з подальшою інтерференцією прямого та відбитих сигналів на антені приймача. Різниця шляхів проходження прямого та відбитого сигналів призводить до фазового зсуву між ними, що викликає систематичні похибки фазових вимірювань та ускладнює процес розв'язання неоднозначностей. Характерна амплітуда похибок від багатопроменевості у лісових умовах становить від кількох сантиметрів до кількох дециметрів залежно від геометрії розташування відбиваючих поверхонь відносно антени приймача та супутника. Часова варіабельність багатопроменевих похибок обумовлена зміною геометрії супутникової констеляції протягом спостережень, коливаннями гілок дерев під впливом вітру та зміною позиції приймача у кінематичному режимі роботи [5].

Екранування супутникових сигналів елементами лісової рослинності призводить до зменшення кількості видимих супутників та погіршення геометричного фактора, що характеризує просторове розташування супутників відносно приймача. Під щільними кронами дерев приймач може відстежувати лише супутники, розташовані близько до zenіту, що формує вертикально витягнуту геометрію вимірювань з низькою чутливістю до визначення горизонтальних координат. Показник геометричного фактора точності PDOP у лісових умовах часто перевищує значення п'ять-сім одиниць порівняно з типовими значеннями два-три одиниці на відкритій місцевості. Зростання PDOP призводить до пропорційного збільшення середньоквадратичних похибок визначення координат навіть за умови стабільної точності первинних вимірювань псевдовіддалей. Періодичне екранування сигналів окремих супутників під час руху приймача у лісовій місцевості викликає цикли втрат сигналу, що вимагає повторного розв'язання неоднозначностей після відновлення прийому.

Вплив лісової рослинності на надійність фіксованого рішення RTK виявляється у підвищенні ймовірності помилкового розв'язання неоднозначностей через зростання рівня шумів фазових вимірювань та погіршення геометрії супутникової констеляції. Алгоритми цілочисельного оцінювання неоднозначностей базуються на статистичному аналізі серії послідовних вимірювань та вимагають достатньої відмінності між найбільш імовірним набором цілочисельних значень та альтернативними варіантами. Погіршення умов спостережень у лісовій місцевості знижує статистичну впевненість у коректності розв'язання, що може призводити до прийняття помилкового рішення з систематичними похибками у кілька дециметрів або метрів. Сучасні приймачі реалізують додаткові перевірки валідності фіксованого рішення на основі аналізу залишкових нев'язок фазових спостережень та співставлення з результатами кодових вимірювань, однак ці

методи не завжди забезпечують виявлення помилкових рішень у реальному часі [6].

Кількісна оцінка деградації точності RTK вимірювань у лісовій місцевості базується на порівняльних дослідженнях, проведених у різних типах деревостанів за різних сезонних умов. Результати експериментів демонструють, що під щільними кронами хвойних лісів горизонтальна точність RTK вимірювань знижується у три-п'ять разів порівняно з відкритою місцевістю та становить п'ять-десять сантиметрів при стандартному відхиленні. Вертикальна точність деградує ще суттєвіше та може сягати п'ятнадцяти-двадцяти сантиметрів через переважне екранування супутників, розташованих під малими кутами над горизонтом. Частка часу, протягом якого приймач знаходиться у режимі фіксованого рішення, зменшується з типових дев'яноста п'яти відсотків на відкритій місцевості до шістдесяти-сімдесяти відсотків у густих деревостанах. У найскладніших умовах спостережень під багатоярусними мішаними лісами з щільним підліском фіксоване рішення може бути недоступним протягом значної частини спостережень, що робить RTK технологію малоприсадною без додаткових організаційних заходів.

Стратегії мінімізації впливу лісової рослинності на точність GNSS вимірювань включають оптимізацію конфігурації обладнання, вибір раціональних методик польових робіт та застосування спеціалізованих алгоритмів обробки даних. Використання антен з розширеним кутом прийому сигналів та поліпшеними характеристиками придушення багатопроменевості дозволяє підвищити стабільність вимірювань у складних умовах спостережень. Подовження часу ініціалізації та накопичення більшої кількості епох спостережень перед розв'язанням неоднозначностей підвищує надійність фіксованого рішення за рахунок зниження продуктивності робіт. Вибір місць встановлення приймача на лісових просіках, галявинах або ділянках з розрідженим деревостаном забезпечує кращу видимість супутників та зменшує вплив багатопроменевості. Проведення вимірювань у безлистяний період для

листяних лісів або у ранкові години до випадання роси у хвойних лісах дозволяє мінімізувати ослаблення супутникових сигналів деревною масою.

1.4 Аналіз вітчизняного та світового досвіду застосування RTK для лісовпорядних робіт

Світова практика застосування RTK технології у лісовому господарстві сформувалася протягом останніх двадцяти років та характеризується переходом від експериментальних досліджень до масштабного впровадження у виробничі процеси лісовпорядкування різних країн. Піонерські роботи щодо оцінки можливостей GNSS у лісовій місцевості були проведені наприкінці дев'яностих років у країнах Скандинавії та Північної Америки, де великі площі лісових територій та економічна значимість лісопромислового комплексу стимулювали впровадження інноваційних технологій геодезичного забезпечення. Фінські дослідники одними з перших систематично вивчали вплив різних типів деревостанів на точність GPS вимірювань та розробили методичні рекомендації щодо раціональної організації GNSS зйомки у лісовій місцевості. Результати цих досліджень продемонстрували принципову можливість досягнення метрової та субметрової точності визначення координат у більшості типів бореальних лісів за умови використання диференційних методів спостережень [8].

Канадський досвід застосування RTK у лісовому господарстві охоплює широкий спектр завдань від інвентаризації лісових ресурсів до планування лісозаготівельних операцій та моніторингу відновлення лісу після природних порушень. Провінційні служби лісового господарства Британської Колумбії та Онтаріо впровадили RTK технологію для створення високоточних цифрових баз даних меж лісових масивів, що знаходяться у різних формах власності та

господарського використання. Інтеграція RTK вимірювань з геоінформаційними системами дозволила автоматизувати процес оновлення лісовпорядної документації та забезпечити оперативний доступ до просторової інформації для прийняття управлінських рішень. Економічна ефективність впровадження RTK у канадському лісовому господарстві обумовлена скороченням часових витрат на польові роботи приблизно у два-три рази порівняно з традиційними методами тахеометричної зйомки та підвищенням точності просторової прив'язки об'єктів лісового фонду.

Скандинавські країни розробили національні стандарти застосування GNSS технологій у лісовпорядкуванні, які регламентують вимоги до точності вимірювань для різних категорій об'єктів лісового фонду та методики контролю якості польових робіт. Шведське агентство з лісового господарства запровадило обов'язкове використання RTK для визначення меж лісосік та розташування залишених насінневих дерев, що дозволяє здійснювати ефективний контроль дотримання лісівничих вимог при проведенні рубок. Норвезькі дослідники зосередилися на розробці спеціалізованих методів постобробки GNSS даних, отриманих у лісовій місцевості, з метою підвищення надійності координатних рішень шляхом виявлення та виключення вимірювань, уражених багатопроменевістю та циклами втрат сигналу. Результати цих досліджень показали можливість досягнення точності п'ять-десять сантиметрів навіть у густих хвойних лісах за умови застосування багатоепохової обробки даних з використанням алгоритмів адаптивної фільтрації.

Американський досвід характеризується масштабним застосуванням RTK технології для кадастрового знімання меж національних лісів та приватних лісових володінь у контексті вирішення земельних суперечок та оптимізації лісокористування. Лісова служба США розгорнула мережу перманентних базових станцій CORS у ключових лісових регіонах, що забезпечило доступ до мережевих RTK послуг для лісогосподарських підприємств без необхідності

встановлення власних базових станцій. Штати Орегон та Вашингтон впровадили програми навчання фахівців лісового господарства основам GNSS технологій та методикам проведення RTK зйомки у специфічних умовах тихоокеанських прибережних лісів з високою вологістю та щільною рослинністю підліску. Економічний ефект від впровадження RTK у лісовому господарстві західних штатів оцінюється у мільйони доларів щорічно за рахунок підвищення продуктивності польових робіт та зменшення площі земельних суперечок.

Європейський союз реалізував програму стандартизації методів геопросторового аналізу лісових екосистем, яка включає гармонізацію вимог до точності GNSS вимірювань у лісовому господарстві держав-членів. Німецькі землі Баварія та Баден-Вюртемберг створили регіональні мережі перманентних базових станцій з безкоштовним доступом для лісогосподарських підприємств, що стимулювало масове впровадження RTK технології у практику лісовпорядкування. Французький національний інститут лісового господарства розробив методику інтегрованого використання RTK вимірювань та даних лазерного сканування для створення високоточних тривимірних моделей лісових масивів, які використовуються для оцінки запасів деревини та моделювання динаміки росту насаджень. Австрійські дослідники зосередилися на застосуванні RTK у гірських лісах Альп, де складна топографія та обмежена видимість супутників створюють додаткові виклики для забезпечення стабільної роботи системи.

Азіатський досвід застосування RTK у лісовому господарстві представлений переважно Японією та Китаєм, де великі площі гірських лісів вимагають ефективних методів дистанційного моніторингу та картографування. Японське агентство з лісового господарства впровадило RTK технологію для моніторингу наслідків землетрусів та зсувів у гірських лісових масивах, де традиційні методи геодезичної зйомки малоефективні через важкодоступність території та ризики для безпеки виконавців робіт. Китайська програма

моніторингу деградації лісів включає створення мережі постійних спостережних ділянок з високоточною GNSS прив'язкою, що дозволяє відстежувати динаміку меж лісових масивів та оцінювати ефективність програм відновлення лісового покриву. Південна Корея розробила мобільні системи лісової інвентаризації на базі планшетних комп'ютерів з інтегрованими RTK приймачами, які дозволяють польовим таксаторам безпосередньо у лісі вносити дані про таксаційні показники деревостанів з автоматичною геоприв'язкою до електронної бази даних.

Вітчизняний досвід застосування RTK технології у лісовому господарстві розвивається з певним запізненням порівняно зі світовою практикою, однак демонструє позитивну динаміку впровадження інноваційних методів геодезичного забезпечення лісовпорядних робіт. Державне агентство лісових ресурсів України ініціювало пілотні проекти використання GNSS технологій для інвентаризації лісів та створення електронних лісовпорядних планів у кількох регіонах країни. Державні лісогосподарські підприємства Житомирської та Рівненської областей першими запровадили RTK зйомку для визначення меж лісових кварталів та виділів в рамках оновлення лісовпорядної документації. Результати впровадження продемонстрували можливість скорочення термінів польових робіт у два з половиною рази та підвищення точності просторової прив'язки об'єктів лісового фонду до п'яти-десяти сантиметрів порівняно з двадцятьма-тридцятьма сантиметрами при використанні традиційних методів.

Національний університет біоресурсів і природокористування України проводить наукові дослідження щодо оцінки ефективності різних конфігурацій GNSS обладнання для роботи у характерних типах деревостанів українського Полісся та Лісостепу. Експериментальні роботи в умовах соснових, дубових та мішаних лісів дозволили встановити кількісні залежності точності RTK вимірювань від таксаційних характеристик деревостанів та розробити рекомендації щодо оптимальних методик проведення польових робіт.

Дослідження показали, що у молодняках та середньовікових насадженнях з повнотою до нуля сім одиниць можливе досягнення горизонтальної точності три-п'ять сантиметрів при дев'яноста відсотках часу у режимі фіксованого рішення. У стиглих та перестійних деревостанах з повнотою понад нуль вісім одиниць точність знижується до десяти-п'ятнадцяти сантиметрів з часткою фіксованого рішення шістдесят-сімдесят відсотків часу спостережень.

Карпатський регіон характеризується специфічними умовами застосування RTK технології через поєднання гірського рельєфу та щільних букових і ялинових лісів на значних висотах над рівнем моря. Івано-Франківське обласне управління лісового та мисливського господарства ініціювало дослідний проект використання RTK для моніторингу меж природоохоронних територій у Карпатському національному природному парку. Складність робіт обумовлена обмеженою видимістю супутників через оточуючі гірські схили та необхідністю проведення вимірювань у важкодоступних високогірних ділянках з відсутньою інфраструктурою. Застосування мережевих RTK послуг на основі перманентних станцій мережі ZAKPOS дозволило уникнути необхідності встановлення локальних базових станцій у віддалених районах та забезпечити стабільне покриття коригуючою інформацією через мобільний інтернет.

Степовий регіон України представляє протилежний полюс умов застосування RTK технології, де рідколісся та лісові насадження штучного походження створюють мінімальні перешкоди для прийому супутникових сигналів. Лісогосподарські підприємства Херсонської та Миколаївської областей використовують RTK для планування та контролю виконання робіт зі створення нових лісових насаджень на деградованих землях та протиерозійних схилах. Висока точність визначення координат місць посадки лісових культур дозволяє здійснювати моніторинг їх збереженості та росту протягом багатьох років з використанням повторних GNSS вимірювань на тих самих точках. Економічна ефективність застосування RTK у степових лісництвах виявляється

у оптимізації витрат на догляд за лісовими культурами шляхом точного визначення меж ділянок, які потребують лісівничих втручань.

Перспективи розвитку застосування RTK технології у вітчизняному лісовому господарстві пов'язані з розширенням покриття мережами перманентних базових станцій, впровадженням національних стандартів точності GNSS вимірювань для різних категорій лісовпорядних робіт та інтеграцією RTK даних з іншими джерелами геопросторової інформації у єдині інформаційні системи управління лісовими ресурсами. Державна служба геодезії картографії та кадастру України розширює мережу станцій GNSS корекції ZAKPOS, що створює технічні передумови для повсюдного доступу лісгосподарських підприємств до мережевих RTK послуг без необхідності інвестування у власне базове обладнання [7]. Розробка галузевих нормативних документів, які регламентують методики RTK зйомки у лісовій місцевості та критерії прийомки виконаних робіт, сприятиме стандартизації технологічних процесів та підвищенню довіри до результатів GNSS вимірювань з боку контролюючих органів.

Висновки до розділу 1

Аналіз теоретичних основ та практичного досвіду застосування GNSS технологій у лісовому господарстві дозволяє сформулювати наступні узагальнення. Сучасна методологія геодезичного забезпечення лісовпорядних робіт характеризується переходом від традиційних наземних методів зйомки до інтегрованого використання супутникових навігаційних систем, дистанційного зондування та геоінформаційних технологій, що забезпечує підвищення точності, продуктивності та економічної ефективності робіт.

Технологія RTK GNSS забезпечує сантиметрову точність визначення координат у реальному часі завдяки використанню фазових вимірювань несучої частоти супутникових сигналів та диференційної обробки спостережень базової та рухомої станцій. Функціональні можливості сучасних RTK систем

включають одночасне використання множинних супутникових констеляцій, мережеві технології обробки даних та інтеграцію з геоінформаційними системами для автоматизації процесів збору та аналізу просторової інформації.

Лісова рослинність створює специфічні умови поширення супутникових сигналів, які призводять до значної деградації точності та надійності GNSS вимірювань через послаблення потужності сигналу, багатопроменеве поширення, екранування супутників та погіршення геометрії супутникової констеляції. Кількісна оцінка впливу різних типів деревостанів на точність RTK вимірювань демонструє зниження точності у три-п'ять разів порівняно з відкритою місцевістю та зменшення частки часу у режимі фіксованого рішення до шістдесяти-сімдесяти відсотків у найскладніших умовах спостережень.

Світовий досвід застосування RTK у лісовому господарстві охоплює широкий спектр завдань від кадастрового знімання меж лісових масивів до моніторингу лісопатологічних процесів та оцінки наслідків природних порушень. Країни з розвиненим лісовим господарством створили національні стандарти використання GNSS технологій, розгорнули мережі перманентних базових станцій та розробили методичні рекомендації щодо забезпечення якості польових робіт у специфічних умовах різних типів лісів.

Вітчизняна практика застосування RTK технології у лісовому господарстві розвивається у напрямку масштабного впровадження інноваційних методів геодезичного забезпечення лісовпорядних робіт з урахуванням специфіки різних природно-кліматичних зон України та особливостей організаційної структури галузі. Перспективи подальшого розвитку пов'язані з розширенням покриття мережами перманентних базових станцій, впровадженням національних стандартів точності та інтеграцією RTK даних у єдині інформаційні системи управління лісовими ресурсами.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА

2.1 Вибір та обґрунтування ділянок дослідження

Вибір експериментальних ділянок для проведення дослідження точності RTK GNSS вимірювань у лісовій місцевості базувався на необхідності забезпечення репрезентативності результатів для різних типів деревостанів, характерних для українського Передкарпаття. Територія досліджень охоплює лісові масиви у межах Івано-Франківської області, зокрема прилеглі до Галицького національного природного парку лісові квартали, які характеризуються різноманітністю породного складу, віковою структурою насаджень та варіабельністю лісівничо-таксаційних показників деревостанів. Географічне розташування об'єкта дослідження у зоні мішаних лісів Передкарпаття забезпечує можливість екстраполяції отриманих результатів на значну частину лісового фонду західного регіону України з подібними природно-кліматичними умовами та типологічною структурою лісів.

Методологія вибору конкретних ділянок спостережень передбачала попередній аналіз лісовпорядної документації досліджуваної території з метою ідентифікації деревостанів, які представляють градацію умов від мінімального

до максимального впливу лісової рослинності на поширення супутникових сигналів. Критеріями диференціації ділянок визначено повноту деревостану як інтегральний показник щільності розміщення дерев та ступеня зімкнення крон, породний склад насаджень з розподілом на хвойні та листяні деревостани, висоту та діаметр переважаючої частини дерев як показники вертикальної структури насаджень, характер рельєфу ділянки та експозицію схилів відносно сторін світу. Комбінація цих факторів визначає інтегральний ефект впливу лісової екосистеми на умови прийому супутникових сигналів та формує специфічне середовище для тестування можливостей RTK технології.

Ділянка номер один була закладена у межах відкритої території на узліссі лісового масиву, де деревна рослинність практично відсутня, а видимість небосхилу не обмежена елементами деревостанів. Ця ділянка виконує функцію контрольної або еталонної для порівняння з



результатами вимірювань у лісових умовах та дозволяє встановити базовий рівень точності RTK вимірювань за відсутності впливу рослинності. Характеристика ділянки включає рівнинний рельєф з перепадами висот не більше п'ятдесяти сантиметрів на площі експерименту. Геоморфологічна позиція ділянки відповідає слабкохвилястій терасі річки Бистриці з добре дренованими дерново-підзолистими ґрунтами на водно-льодовикових відкладах. Висота над рівнем моря становить приблизно двісті дев'яносто метрів, що є типовим для долини річки у межах Івано-Франківської обл.

Ділянка номер два представляє молодняк сосни звичайної віком близько п'ятнадцяти років з середньою висотою дерев вісім-дев'ять метрів та діаметром



Рисунок 2.2 – Знімок ділянки №2

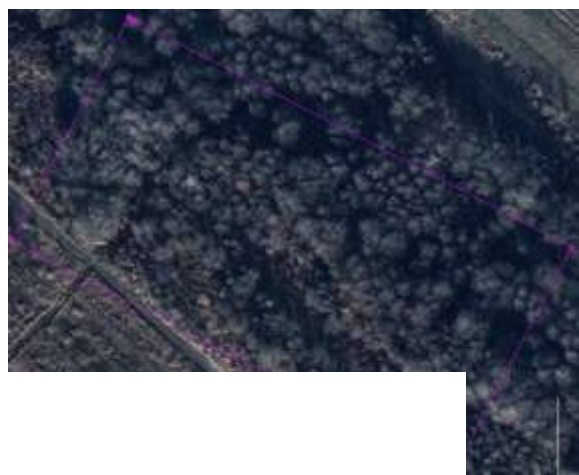
стовбурів на висоті грудей дванадцять-чотирнадцять сантиметрів. Повнота деревостану оцінюється на рівні нуля шість одиниць, що відповідає середньому ступеню зімкнення крон з наявністю значних просвітів між окремими деревами. Рельєф ділянки характеризується незначним похилом поверхні близько трьох-п'яти градусів північно-західної експозиції. Ця ділянка моделює умови помірного впливу лісової рослинності на супутникові вимірювання, типові для молодих та середньовікових насаджень хвойних порід з неповним зімкненням крон.

Ділянка номер три закладена у середньовіковому мішаному деревостані віком сорок п'ять-п'ятдесят років з переважанням дуба звичайного у складі насадження. Формула складу деревостану відповідає співвідношенню шість частин дуба, три частини сосни та одна частина берези повислої у деревному ярусі. Середня висота деревостану становить вісімнадцять-двадцять метрів, діаметр стовбурів на висоті грудей варіює від двадцяти чотирьох до



Рисунок 2.3 – Знімок ділянки №3 тридцяти двох сантиметрів. Повнота насадження оцінюється на рівні нуля вісім одиниць, що свідчить про високий ступінь зімкнення крон та обмежену видимість верхньої півсфери з поверхні ґрунту. Рельєф ділянки відповідає пологому схилу крутизною вісім-десять градусів південно-східної експозиції, що характерно для передгірських ландшафтів Передкарпаття.

Ділянка номер чотири представляє найскладніші умови для РТК вимірювань серед досліджуваних об'єктів та закладена у стиглому



ялиновому деревостані віком вісімдесят п'ять-дев'яносто років з домішкою бука лісового. Склад насадження відповідає формулі вісім частин ялини європейської та дві частини бука лісового з середньою висотою деревного ярусу двадцять вісім-тридцять два метри та діаметром стовбурів на висоті грудей сорок-п'ятдесят сантиметрів. Повнота деревостану максимальна серед досліджуваних ділянок та становить нуля дев'ять одиниць, що відповідає практично суцільному зімкненню крон з мінімальними просвітами для проникнення прямого сонячного світла до поверхні ґрунту. Рельєф ділянки характеризується середньою крутизною схилу п'ятнадцять-вісімнадцять градусів північної експозиції з ознаками поверхневого стоку атмосферних опадів у вигляді мікроерозійних борозенок.

Просторове розташування експериментальних ділянок відносно базової станції RTK системи та елементів геодезичної інфраструктури регіону мало принципове значення для забезпечення коректності результатів досліджень. Всі чотири ділянки розташовані у радіусі приблизно п'яти кілометрів від центральної частини міста Івано-Франківська, де знаходяться найближчі перманентні станції державної мережі активних референтних станцій ZAKPOS. Відстань до найближчої базової станції ZAKPOS становить близько восьми кілометрів для найвіддаленішої ділянки номер чотири та шість кілометрів для контрольної ділянки номер один. Така конфігурація розміщення дозволяє мінімізувати вплив диференційних атмосферних похибок на результати порівняльного аналізу точності вимірювань у різних умовах спостережень, оскільки всі ділянки знаходяться у межах однієї зони з подібними характеристиками іоносферних та тропосферних затримок супутникових сигналів.

Геодезична основа експерименту включала визначення координат контрольних пунктів на кожній ділянці методом тривалих статичних GNSS

спостережень з постобробкою даних у режимі високоточного позиціонування PPP. Контрольні пункти закладалися у вигляді бетонних монолітів з металевим центром, заглиблених у ґрунт на глибину шістдесят сантиметрів для забезпечення стабільності положення протягом тривалого періоду часу. На кожній ділянці було закладено десять контрольних пунктів, рівномірно розподілених по території ділянки для забезпечення репрезентативності результатів та врахування локальної варіабельності умов спостережень. Статичні спостереження на контрольних пунктах проводилися протягом чотирьох годин безперервної реєстрації супутникових сигналів з інтервалом запису одна секунда та кутом відсікання супутників п'ятнадцять градусів над горизонтом. Постобробка статичних даних здійснювалася з використанням точних ефемерид супутників та параметрів обертання Землі, завантажених з міжнародних центрів GNSS даних, що забезпечило визначення координат контрольних пунктів з точністю один-два сантиметри у плані та три-чотири сантиметри по висоті.

Фенологічний стан рослинності на момент проведення польових робіт відповідав періоду повної вегетації листяних порід у другій половині літнього сезону, що створювало умови максимального впливу листкової маси на ослаблення супутникових сигналів. Вибір цього періоду для проведення експерименту обумовлений необхідністю дослідження найгірших умов спостережень, які визначають нижню межу можливостей RTK технології у лісовій місцевості. Метеорологічні умови під час польових робіт характеризувалися відсутністю атмосферних опадів протягом попередніх сорока восьми годин, що забезпечило мінімальну вологість деревної маси та виключило додатковий фактор впливу вологи на ослаблення супутникових сигналів. Температура повітря становила двадцять два-двадцять шість градусів Цельсія, відносна вологість повітря коливалася у межах п'ятдесят п'ять-шістдесят п'ять відсотків, швидкість вітру не перевищувала два-три метри за секунду. Такі метеорологічні умови можна вважати типовими для літнього

періоду у регіоні досліджень та сприятливими для проведення GNSS вимірювань з точки зору відсутності екстремальних атмосферних явищ [9].

2.2 Методика проведення польових вимірювань

Технічне забезпечення польових робіт базувалося на використанні двочастотного GNSS RTK приймача Hi-Target V100, який підтримує одночасне відстеження супутників систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou на частотах L1, L2 та L5. Приймач оснащений вбудованим радіомодемом для прийому коригуючої інформації від базової станції, модулем мобільного зв'язку четвертого покоління для підключення до мережевих RTK сервісів через протокол NTRIP та контролером на базі операційної системи Android для управління параметрами вимірювань та первинної обробки даних. Технічні характеристики приймача, задекларовані виробником, включають горизонтальну точність визначення координат у режимі RTK один сантиметр плюс одна частина на мільйон від довжини базової лінії при стандартному відхиленні, вертикальну точність два сантиметри плюс одна частина на мільйон, час ініціалізації для отримання фіксованого рішення менше десяти секунд за типових умов спостережень. Антена приймача являє собою геодезичну антену з функцією придушення багатопроменевості на основі технології choke ring, що мінімізує вплив відбитих супутникових сигналів на точність фазових вимірювань [10].

Конфігурація приймача для проведення експериментальних вимірювань передбачала використання мережевого RTK режиму з підключенням до найближчої базової станції системи ZAKPOS через мобільний інтернет. Параметри налаштування приймача включали кут відсікання супутників п'ятнадцять градусів над горизонтом для виключення вимірювань супутників, сигнали яких проходять найдовший шлях через атмосферу та найбільше спотворюються рефракцією, інтервал запису вимірювань одна секунда для забезпечення детального моніторингу динаміки параметрів спостережень,

режим вимірювань статичний з фіксацією антени на штативі над точкою вимірювання, мінімальну кількість супутників для обчислення координат п'ять одиниць, мінімальне співвідношення сигнал-шум двадцять п'ять децибел-герц для прийняття вимірювань у обробку. Система координат вимірювань відповідала місцевій системі координат МСК-26 з висотами у Балтійській системі, що забезпечило безпосередню сумісність результатів з регіональною геодезичною інфраструктурою Івано-Франківської області.

Методика польових вимірювань передбачала триразове виконання RTK зйомки всіх десяти контрольних пунктів на кожній експериментальній ділянці з інтервалом в один день. Така організація експерименту дозволяє оцінити повторюваність результатів RTK вимірювань, виявити систематичні похибки координатного рішення та проаналізувати варіабельність точності у часі при зміні геометрії супутникової констеляції. Перша серія вимірювань розпочиналася після встановлення стабільного з'єднання з базовою станцією ZAKPOS та успішної ініціалізації приймача з отриманням фіксованого рішення на контрольному пункті з найкращими умовами видимості супутників. На кожному контрольному пункті виконувалося вимірювання тривалістю дві хвилини з безперервною реєстрацією координат з інтервалом одна секунда, що забезпечувало накопичення ста двадцяти епох спостережень на одній точці [11].

Висота встановлення антени над центром контрольного пункту вимірювалася рулеткою з точністю один міліметр від площини центрального диска антени до поверхні центру репера та становила постійну величину один метр шістдесят сантиметрів для всіх вимірювань на всіх ділянках. Стабільність висоти антени забезпечувалася використанням геодезичного штатива з фіксацією висоти центрального стрижня та контролем вертикальності встановлення за допомогою вбудованого циліндричного рівня. Центрування антени над центром репера здійснювалося оптичним центриром з точністю не гірше одного міліметра у плані. Така методика встановлення приймача

відповідає стандартним вимогам до проведення геодезичних GNSS вимірювань та мінімізує вплив інструментальних похибок на результати експерименту.

Послідовність виконання зйомки на кожній ділянці була стандартизована для забезпечення порівнянності результатів між різними серіями вимірювань. Оператор переміщувався від контрольного пункту до контрольного пункту у заздалегідь визначеному порядку, починаючи з точки номер один та завершуючи точкою номер десять. На кожній точці виконувалися наступні операції: встановлення штатива над центром репера з контролем центрування за допомогою оптичного центрира, закріплення антени на штативі з вимірюванням висоти антени рулеткою, очікування отримання фіксованого рішення приймачем після можливої втрати супутникових сигналів під час переміщення, реєстрація координат протягом двох хвилин безперервних спостережень, збереження результатів вимірювань у пам'яті контролера з присвоєнням унікального ідентифікатора точки. Час виконання однієї серії зйомки десяти контрольних пунктів на одній ділянці становив приблизно тридцять–тридцять п'ять хвилин залежно від складності рельєфу та відстаней між точками.

Друга та третя серії вимірювань виконувалися на тих самих контрольних пунктах у тій самій послідовності з інтервалом в один день між серіями, що забезпечило зміну геометрії супутникової констеляції та дозволило оцінити стабільність координатного рішення у різних умовах спостережень. Перед початком кожної наступної серії здійснювався попередній контроль якості отриманих даних шляхом перегляду журналу вимірювань у контролері та перевірки наявності записів для всіх десяти контрольних пунктів з достатньою кількістю епох спостережень. Загальна тривалість польових робіт на одній ділянці становила три дні з урахуванням часових інтервалів між серіями вимірювань.

Протягом кожної серії вимірювань здійснювалася безперервна реєстрація допоміжних параметрів спостережень, які характеризують умови прийому супутникових сигналів та якість координатного рішення. До переліку реєстрованих параметрів входили кількість супутників, сигнали яких використовувалися для обчислення координат у кожен епоху спостережень, окремо для кожної супутникової системи та сумарно для всіх систем; геометричний фактор точності PDOP як показник просторового розташування супутників відносно приймача; статус координатного рішення з розподілом на фіксоване рішення з розв'язаними цілочисельними неоднозначностями, плаваюче рішення з дійсними значеннями неоднозначностей та рішення на основі кодових вимірювань без використання фазової інформації; оцінка точності горизонтальних та вертикальних координат, обчислена приймачем на основі дисперсій фазових вимірювань та геометрії супутників; відношення сигнал-шум для кожного супутника окремо; кількість циклів втрат супутникових сигналів протягом сеансу спостережень.

Синхронізація вимірювань на різних ділянках здійснювалася шляхом проведення польових робіт у межах компактного часового інтервалу протягом трьох днів за стабільних метеорологічних умов та подібної конфігурації супутникової констеляції. Така організація експерименту дозволила мінімізувати вплив часової варіабельності параметрів іоносфери та геометрії супутників на результати порівняльного аналізу точності вимірювань у різних умовах спостережень. Послідовність відвідування ділянок планувалася таким чином, щоб на кожній ділянці вимірювання проводилися приблизно в один і той самий час доби з інтервалом плюс-мінус одна година між днями, що забезпечило подібність умов освітлення та фенологічного стану рослинності. Контроль стабільності умов вимірювань здійснювався шляхом щоденного повторення контрольних вимірювань на відкритій ділянці номер один на початку та у кінці робочого дня для виявлення можливих систематичних змін

точності RTK рішення через варіації стану іоносфери або технічних проблем обладнання.

Особливості методики вимірювань на ділянках під лісовою рослинністю включали додаткову документацію просторового розташування дерев навколо контрольних пунктів для подальшого аналізу кореляції між структурою деревостану та параметрами GNSS вимірювань [12]. Для кожного контрольного пункту виконувалося картування найближчих дерев у радіусі п'ятнадцять метрів з визначенням відстані та азимута від точки спостережень до стовбура кожного дерева, вимірюванням діаметра стовбура на висоті грудей та оцінкою висоти дерева. Фотографічна документація включала панорамне знімання верхньої півсфери над точками спостережень за допомогою цифрової камери з об'єктивом типу fisheye для кількісної оцінки частки небосхилу, закритої кронами дерев. Обробка панорамних знімків методами бінарної класифікації зображення дозволила обчислити процент відкритої верхньої півсфери як інтегральний показник ступеня екранування супутників лісовою рослинністю. Цей показник варіював від ста відсотків на контрольній відкритій ділянці до двадцяти п'яти–тридцяти відсотків на ділянці у густому ялиновому деревостані/

2.3 Методика камеральної обробки та порівняльного аналізу даних

Камеральна обробка результатів польових вимірювань включала кілька послідовних етапів аналізу даних з метою всебічної оцінки точності та надійності RTK вимірювань у різних умовах спостережень. Первинна обробка передбачала імпорт даних з контролера приймача у форматі текстових файлів, що містять часові мітки вимірювань, координати точок у системі МСК-26, оцінки точності горизонтальних та вертикальних координат, параметри супутникових спостережень та службову інформацію про статус координатного рішення. Структуризація даних здійснювалася шляхом розподілу вимірювань за ділянками, контрольними пунктами та окремими серіями спостережень з

присвоєнням унікальних ідентифікаторів кожному набору даних для забезпечення можливості автоматизованої обробки та статистичного аналізу.

Обчислення відхилень вимірних координат від еталонних значень, визначених методом тривалих статичних спостережень, виконувалося окремо для горизонтальних та вертикальних компонент положення точок. Горизонтальні відхилення обчислювалися як евклідова відстань між вимірною та еталонною точками у площині проекції МСК-26 за формулою, що включає квадратний корінь з суми квадратів різниць координат по осях X та Y. Вертикальні відхилення визначалися як різниця між вимірною та еталонною висотою у Балтійській системі висот. Знак вертикального відхилення дозволяє ідентифікувати напрямок систематичної похибки як завищення або заниження вимірної висоти відносно істинного значення. Для кожного контрольного пункту обчислювалися статистичні характеристики відхилень за результатами трьох серій вимірювань, включаючи середнє арифметичне, медіану, стандартне відхилення, мінімальне та максимальне значення, першу та третю квартилі для оцінки розподілу випадкових похибок вимірювань.

Аналіз повторюваності результатів між трьома серіями вимірювань базувався на обчисленні стандартних відхилень координат кожного контрольного пункту за результатами триразових вимірювань (рис. 2.8). Для кожної точки визначалися середні координати за трьома серіями вимірювань та обчислювалися відхилення кожного виміру від середнього значення. Середньоквадратичне відхилення координат за результатами триразових вимірювань характеризує внутрішню збіжність РТК методу та дозволяє оцінити вплив випадкових факторів на точність координатного рішення. Порівняння показників повторюваності між різними ділянками дозволяє кількісно оцінити вплив умов спостережень на стабільність РТК вимірювань.

Порівняльний аналіз точності вимірювань між різними ділянками здійснювався на основі статистичних показників відхилень координат,

агрегованих для всіх контрольних пунктів та всіх серій спостережень на кожній ділянці. Для кожної ділянки обчислювалося середнє квадратичне відхилення горизонтальних та вертикальних координат відносно еталонних значень як міра випадкової компоненти похибок вимірювань. Систематична компонента похибок оцінювалася як середнє арифметичне відхилення з урахуванням знаку для вертикальних координат та середнє горизонтальне зміщення для планових координат. Відношення середньоквадратичного відхилення на кожній лісовій ділянці до відповідного показника на контрольній відкритій ділянці визначає коефіцієнт деградації точності внаслідок впливу лісової рослинності. Цей коефіцієнт є ключовим показником для кількісної оцінки впливу різних типів деревостанів на можливості RTK технології.

Аналіз надійності координатного рішення базувався на обчисленні частки часу, протягом якого приймач знаходився у режимі фіксованого рішення з розв'язаними цілочисельними неоднозначностями фазових вимірювань. Для кожного контрольного пункту та кожної серії вимірювань визначалася кількість епох з фіксованим рішенням відносно загальної кількості епох вимірювань та обчислювався процентний показник доступності фіксованого рішення. Середнє значення цього показника по всіх контрольних пунктах та серіях на кожній ділянці характеризує інтегральну надійність RTK технології у відповідних умовах спостережень. Додатково аналізувалися епізоди втрати фіксованого рішення з оцінкою їх тривалості та частоти виникнення для характеристики стабільності роботи системи у часі. Час до першого отримання фіксованого рішення після встановлення приймача на кожному контрольному пункті є важливим практичним параметром, що визначає продуктивність польових робіт, і обчислювався для кожного випадку окремо з подальшим статистичним аналізом розподілу цього показника.

Кореляційний аналіз між характеристиками деревостанів та параметрами GNSS вимірювань виконувався з метою встановлення кількісних залежностей точності та надійності RTK від лісівничо-таксаційних показників насаджень.

Для кожної ділянки обчислювалися коефіцієнти кореляції між такими парами змінних як повнота деревостану та середньоквадратичне відхилення горизонтальних координат, висота деревостану та частка часу з фіксованим рішенням, процент відкритої верхньої півсфери за панорамними знімками та середня кількість супутників у спостереженнях. Множинна регресійна модель будувалася для прогнозування очікуваної точності RTK вимірювань на основі комбінації кількох характеристик деревостану з оцінкою статистичної значимості коефіцієнтів регресії та коефіцієнта детермінації моделі у цілому. Така модель може використовуватися для попереднього планування лісовпорядних робіт та оцінки доцільності застосування RTK технології у конкретних умовах деревостану без необхідності проведення тестових вимірювань.

Аналіз розподілу відхилень координат відносно нормального закону розподілу виконувався для перевірки статистичних припущень, які лежать в основі методів оцінки точності геодезичних вимірювань. Для кожної ділянки будувалися гістограми емпіричного розподілу горизонтальних та вертикальних відхилень з накладанням теоретичної кривої нормального розподілу з параметрами, оціненими за вибіркою. Критерій згоди Колмогорова-Смірнова використовувався для статистичної перевірки гіпотези про нормальність розподілу відхилень з рівнем значимості нуля п'ять. Відхилення емпіричного розподілу від нормального, виявлені на ділянках під щільною лісовою рослинністю, свідчать про наявність специфічних механізмів формування похибок, що не описуються класичною теорією випадкових похибок вимірювань. Аналіз коефіцієнтів асиметрії та ексцесу емпіричних розподілів дозволяє кількісно охарактеризувати напрямок та ступінь відхилення від нормального закону.

Просторовий аналіз розподілу точності вимірювань у межах кожної ділянки базувався на порівнянні результатів на десяти контрольних пунктах, розташованих у різних частинах ділянки з потенційно відмінними умовами

видимості супутників через локальну варіабельність густоти крон. Дисперсійний аналіз використовувався для статистичної перевірки гіпотези про однорідність точності вимірювань між різними контрольними пунктами на одній ділянці. Значимість різниці точності між пунктами свідчить про істотний вплив мікромасштабної просторової варіабельності структури деревостану на умови GNSS спостережень. Побудова карт просторового розподілу очікуваної точності RTK вимірювань на основі інтерполяції результатів на контрольних пунктах дозволяє візуалізувати зони з оптимальними та несприятливими умовами для проведення геодезичних робіт у межах лісової ділянки.

Узагальнення результатів камеральної обробки включало формування підсумкових таблиць статистичних показників точності та надійності RTK вимірювань для кожної ділянки дослідження з розподілом на горизонтальну та вертикальну компоненти точності. Графічна презентація результатів у вигляді стовпчикових діаграм, графіків розсіювання та картограм дозволяє наочно продемонструвати закономірності деградації точності зі збільшенням густоти лісової рослинності. Формулювання емпіричних залежностей між характеристиками деревостанів та параметрами GNSS вимірювань у вигляді математичних рівнянь забезпечує можливість кількісного прогнозування очікуваної точності RTK для нових ділянок на основі їх лісівничо-таксаційних показників без необхідності проведення експериментальних вимірювань.

Висновки до розділу 2

Методика дослідження точності RTK GNSS вимірювань у лісовій місцевості базується на порівняльному аналізі результатів триразових спостережень на чотирьох експериментальних ділянках, які представляють градацію умов від відкритої місцевості до густого стиглого ялинового деревостану. Вибір ділянок у межах Івано-Франківської області та прилеглих до Галицького національного природного парку лісових кварталів забезпечує репрезентативність результатів для умов Передкарпаття та можливість

екстраполяції висновків на значну частину лісового фонду західного регіону України.

Застосування двочастотного GNSS RTK приймача Hi-Target V100 з підтримкою множинних супутникових констеляцій та підключенням до мережеских RTK сервісів системи ZAKPOS забезпечує використання сучасної технології диференційних вимірювань, яка відповідає світовому рівню геодезичного обладнання для лісовпорядних робіт. Використання місцевої системи координат МСК-26 забезпечує безпосередню інтеграцію результатів з регіональною геодезичною інфраструктурою Івано-Франківської області.

Методика польових вимірювань включає триразову зйомку десяти контрольних пунктів на кожній ділянці з часовими в день, що дозволяє оцінити повторюваність результатів RTK вимірювань та вплив часової варіабельності геометрії супутникової констеляції на точність координатного рішення. Стандартизована процедура виконання вимірювань забезпечує порівнянність результатів між різними ділянками та серіями спостережень.

Камеральна обробка результатів базується на статистичному аналізі відхилень вимірних координат від еталонних значень з обчисленням середньоквадратичних похибок, показників повторюваності, частки часу у режимі фіксованого рішення та кореляційних залежностей між характеристиками деревостанів та параметрами GNSS вимірювань. Комплексний підхід до аналізу даних забезпечує всебічну оцінку можливостей та обмежень RTK технології для геодезичного забезпечення лісовпорядних робіт у різних типах лісових екосистем. Розроблена методика може бути адаптована для проведення аналогічних досліджень в інших регіонах України з метою формування національної бази даних про точність GNSS вимірювань у різних природно-кліматичних зонах та типах лісової рослинності.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ RTK GNSS

3.1. Результати RTK GNSS зйомок на тестових ділянках

Експериментальні дослідження точності RTK GNSS вимірювань проводилися на чотирьох тестових ділянках, які характеризуються різним ступенем затемнення крон деревостанів від повної відкритості до густого стиглого ялинового лісу з повнотою 0,9 одиниць. На кожній ділянці було виконано триразове визначення координат десяти контрольних пунктів протягом трьох днів спостережень, що забезпечило статистичну репрезентативність отриманих результатів. Загальна кількість виконаних вимірювань становила 120 спостережень, які дозволили всебічно оцінити вплив лісової рослинності на точність та надійність RTK позиціонування.

Після завершення польових вимірювань було проведено камеральну обробку даних, результати якої систематизовано у вигляді таблиць координат та похибок для кожної ділянки окремо. Первинні дані спостережень включають виміряні координати контрольних пунктів у системі МСК-26, часові мітки вимірювань, кількість супутників та геометричний фактор точності для кожної епохи спостережень. Результати обробки даних для ділянки №1 представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Результати вимірювань на ділянці 1 (відкрита місцевість)

| Номер | Імя | N | E | Z | Н ант, | σ_N | σ_E | σ_Z | Кол-во эп | Статус | Різниця епох | Супутники | PDOP |
|--------|-----|-------------|------------|---------|--------|------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-------|
| день 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5435351,576 | 292437,807 | 305,812 | 1,871 | 0,017 | 0,014 | 0,013 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,6 |
| 2 | pt1 | 5435358,137 | 292458,246 | 305,123 | 1,871 | 0,015 | 0,013 | 0,021 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 26 | 2,7 |
| 3 | pt2 | 5435364,698 | 292478,686 | 304,569 | 1,871 | 0,012 | 0,01 | 0,023 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,8 |
| 4 | pt3 | 5435371,511 | 292505,181 | 304,454 | 1,871 | 0,014 | 0,012 | 0,03 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,6 |
| 5 | pt4 | 5435378,324 | 292531,677 | 304,124 | 1,871 | 0,016 | 0,014 | 0,028 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 27 | 2,7 |
| 6 | pt5 | 5435424,755 | 292515,527 | 304,027 | 1,871 | 0,013 | 0,011 | 0,026 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 27 | 2,6 |
| 7 | pt6 | 5435416,68 | 292493,195 | 304,291 | 1,871 | 0,01 | 0,009 | 0,022 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,8 |
| 8 | pt7 | 5435408,605 | 292470,863 | 304,438 | 1,871 | 0,012 | 0,01 | 0,024 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,7 |
| 9 | pt8 | 5435403,306 | 292449,036 | 305,032 | 1,871 | 0,013 | 0,012 | 0,027 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,6 |
| 10 | pt9 | 5435398,007 | 292427,209 | 305,444 | 1,871 | 0,011 | 0,01 | 0,029 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,7 |
| день 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5435351,61 | 292437,842 | 305,795 | 1,871 | 0,018 | 0,015 | 0,012 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,7 |
| 2 | pt1 | 5435358,102 | 292458,279 | 305,151 | 1,871 | 0,016 | 0,013 | 0,022 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 26 | 2,8 |
| 3 | pt2 | 5435364,735 | 292478,659 | 304,541 | 1,871 | 0,012 | 0,011 | 0,024 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,6 |
| 4 | pt3 | 5435371,474 | 292505,214 | 304,481 | 1,871 | 0,014 | 0,012 | 0,03 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,7 |
| 5 | pt4 | 5435378,36 | 292531,649 | 304,098 | 1,871 | 0,015 | 0,013 | 0,029 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,6 |
| 6 | pt5 | 5435424,781 | 292515,562 | 304,054 | 1,871 | 0,013 | 0,012 | 0,027 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 27 | 2,7 |
| 7 | pt6 | 5435416,714 | 292493,221 | 304,326 | 1,871 | 0,011 | 0,01 | 0,023 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 26 | 2,6 |
| 8 | pt7 | 5435408,572 | 292470,895 | 304,461 | 1,871 | 0,012 | 0,011 | 0,025 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,8 |
| 9 | pt8 | 5435403,278 | 292449,067 | 305,051 | 1,871 | 0,013 | 0,012 | 0,026 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,7 |
| 10 | pt9 | 5435398,041 | 292427,234 | 305,427 | 1,871 | 0,012 | 0,011 | 0,028 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,9 |
| день 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5435351,547 | 292437,776 | 305,846 | 1,871 | 0,019 | 0,016 | 0,011 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,667 |
| 2 | pt1 | 5435358,171 | 292458,213 | 305,089 | 1,871 | 0,015 | 0,012 | 0,023 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 26 | 2,7 |
| 3 | pt2 | 5435364,661 | 292478,712 | 304,593 | 1,871 | 0,011 | 0,01 | 0,025 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,6 |
| 4 | pt3 | 5435371,548 | 292505,147 | 304,426 | 1,871 | 0,013 | 0,011 | 0,031 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,6 |
| 5 | pt4 | 5435378,288 | 292531,706 | 304,156 | 1,871 | 0,014 | 0,012 | 0,03 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 29 | 2,6 |
| 6 | pt5 | 5435424,728 | 292515,491 | 304,001 | 1,871 | 0,012 | 0,011 | 0,028 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,61 |
| 7 | pt6 | 5435416,647 | 292493,168 | 304,278 | 1,871 | 0,01 | 0,009 | 0,023 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 27 | 2,6 |
| 8 | pt7 | 5435408,637 | 292470,832 | 304,415 | 1,871 | 0,011 | 0,01 | 0,026 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 27 | 2,601 |
| 9 | pt8 | 5435403,334 | 292449,012 | 305,014 | 1,871 | 0,012 | 0,011 | 0,027 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,6 |
| 10 | pt9 | 5435397,973 | 292427,183 | 305,469 | 1,871 | 0,011 | 0,01 | 0,028 | 1 | RTK ФИКС, | 1 | 28 | 2,962 |

Аналіз даних таблиці 3.1 показує високу стабільність координатного рішення на відкритій місцевості з мінімальною варіабельністю між окремими днями спостережень. Для ділянки №2, яка представлена молодняком сосни звичайної, результати вимірювань наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Результати вимірювань на ділянці 2 (молодняк сосни)

| Номер | Имя | N | E | Z | Н ант. | σN | σE | σZ | Кол-во эп | Статус | Спутники | PDOP |
|--------|-----|-------------|------------|---------|--------|------------|------------|------------|-----------|----------|----------|-------|
| день 1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5433413.668 | 287990.961 | 309.764 | 1.871 | 0.016 | 0.011 | 0.027 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 3.400 |
| 2 | pt1 | 5433406.476 | 288012.536 | 309.364 | 1.871 | 0.023 | 0.017 | 0.041 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.100 |
| 3 | pt2 | 5433399.285 | 288034.111 | 309.474 | 1.871 | 0.039 | 0.095 | 0.201 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.900 |
| 4 | pt3 | 5433393.355 | 288055.055 | 310.166 | 1.871 | 0.014 | 0.008 | 0.020 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 8.300 |
| 5 | pt4 | 5433387.425 | 288075.999 | 310.739 | 1.871 | 0.026 | 0.015 | 0.043 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 3.200 |
| 6 | pt5 | 5433353.864 | 288066.158 | 313.345 | 1.871 | 0.031 | 0.029 | 0.025 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.300 |
| 7 | pt6 | 5433361.055 | 288044.835 | 313.365 | 1.871 | 0.042 | 0.024 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 1.900 |
| 8 | pt7 | 5433368.247 | 288023.513 | 314.560 | 1.871 | 0.065 | 0.034 | 0.060 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 2.600 |
| 9 | pt8 | 5433373.294 | 288003.704 | 315.333 | 1.871 | 0.033 | 0.020 | 0.055 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 1.800 |
| 10 | pt9 | 5433378.340 | 287983.895 | 315.665 | 1.871 | 0.035 | 0.021 | 0.059 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 4.500 |
| день 2 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5433413.642 | 287990.989 | 309.736 | 1.871 | 0.015 | 0.010 | 0.028 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 3.300 |
| 2 | pt1 | 5433406.511 | 288012.566 | 309.335 | 1.871 | 0.022 | 0.016 | 0.042 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.900 |
| 3 | pt2 | 5433399.259 | 288034.141 | 309.446 | 1.871 | 0.041 | 0.102 | 0.198 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.800 |
| 4 | pt3 | 5433393.391 | 288055.094 | 310.141 | 1.871 | 0.013 | 0.007 | 0.021 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 8.400 |
| 5 | pt4 | 5433387.397 | 288075.965 | 310.706 | 1.871 | 0.027 | 0.014 | 0.041 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 3.100 |
| 6 | pt5 | 5433353.901 | 288066.192 | 313.320 | 1.871 | 0.030 | 0.031 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.200 |
| 7 | pt6 | 5433361.031 | 288044.861 | 313.339 | 1.871 | 0.043 | 0.025 | 0.027 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.000 |
| 8 | pt7 | 5433368.292 | 288023.491 | 314.532 | 1.871 | 0.067 | 0.033 | 0.061 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.400 |
| 9 | pt8 | 5433373.268 | 288003.736 | 315.302 | 1.871 | 0.032 | 0.019 | 0.054 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 1.700 |
| 10 | pt9 | 5433378.372 | 287983.852 | 315.640 | 1.871 | 0.034 | 0.022 | 0.058 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 4.600 |
| день 3 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5433413.706 | 287990.944 | 309.802 | 1.871 | 0.013 | 0.007 | 0.023 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 3.200 |
| 2 | pt1 | 5433406.447 | 288012.579 | 309.325 | 1.871 | 0.020 | 0.014 | 0.040 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.900 |
| 3 | pt2 | 5433399.312 | 288034.072 | 309.457 | 1.871 | 0.044 | 0.108 | 0.205 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.700 |
| 4 | pt3 | 5433393.366 | 288055.038 | 310.196 | 1.871 | 0.012 | 0.005 | 0.019 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 8.500 |
| 5 | pt4 | 5433387.452 | 288076.028 | 310.728 | 1.871 | 0.025 | 0.012 | 0.044 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 3.200 |
| 6 | pt5 | 5433353.832 | 288066.139 | 313.310 | 1.871 | 0.032 | 0.033 | 0.024 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.100 |
| 7 | pt6 | 5433361.096 | 288044.806 | 313.349 | 1.871 | 0.045 | 0.023 | 0.023 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.000 |
| 8 | pt7 | 5433368.214 | 288023.548 | 314.541 | 1.871 | 0.069 | 0.031 | 0.063 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.400 |
| 9 | pt8 | 5433373.329 | 288003.687 | 315.319 | 1.871 | 0.030 | 0.017 | 0.056 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 1.600 |
| 10 | pt9 | 5433378.382 | 287983.883 | 315.629 | 1.871 | 0.032 | 0.020 | 0.057 | 1 | РТК ФИКС | 19 | 4.500 |

Дані таблиці 3.2 демонструють помірно зростання розкиду координат між днями спостережень порівняно з відкритою місцевістю, що пов'язано з впливом лісової рослинності на умови прийому супутникових сигналів. Результати вимірювань на ділянці №3 у середньовіковому мішаному деревостані представлено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати вимірювань на ділянці 3 (мішаний деревостан)

| Номер | Имя | N | E | Z | Н ант. | σN | σE | σZ | Кол-во эп | Статус | Спутники | PDOP |
|--------|-----|-------------|------------|---------|--------|------------|------------|------------|-----------|----------|----------|-------|
| день 1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5434973.374 | 291786.773 | 276.684 | 1.871 | 0.018 | 0.016 | 0.043 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 2.200 |
| 2 | pt1 | 5434951.294 | 291798.254 | 277.311 | 1.871 | 0.014 | 0.013 | 0.044 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 1.700 |
| 3 | pt2 | 5434929.214 | 291809.736 | 276.891 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 1.800 |
| 4 | pt3 | 5434906.882 | 291821.722 | 276.225 | 1.871 | 0.013 | 0.011 | 0.030 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.900 |
| 5 | pt4 | 5434884.550 | 291833.708 | 276.096 | 1.871 | 0.015 | 0.012 | 0.032 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.600 |
| 6 | pt5 | 5434872.186 | 291804.689 | 279.343 | 1.871 | 0.012 | 0.011 | 0.028 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.600 |
| 7 | pt6 | 5434896.284 | 291793.334 | 279.471 | 1.871 | 0.010 | 0.009 | 0.022 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 1.800 |
| 8 | pt7 | 5434920.382 | 291781.978 | 279.224 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.025 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.000 |
| 9 | pt8 | 5434940.696 | 291773.399 | 279.318 | 1.871 | 0.012 | 0.011 | 0.027 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 2.300 |
| 10 | pt9 | 5434961.009 | 291764.819 | 278.681 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.100 |
| день 2 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5434973.329 | 291786.821 | 276.728 | 1.871 | 0.019 | 0.017 | 0.042 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 2.300 |
| 2 | pt1 | 5434951.338 | 291798.212 | 277.352 | 1.871 | 0.015 | 0.014 | 0.044 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 1.800 |
| 3 | pt2 | 5434929.173 | 291809.781 | 276.934 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.025 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 1.700 |
| 4 | pt3 | 5434906.919 | 291821.689 | 276.262 | 1.871 | 0.013 | 0.011 | 0.030 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.900 |
| 5 | pt4 | 5434884.514 | 291833.753 | 276.141 | 1.871 | 0.014 | 0.012 | 0.031 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.600 |
| 6 | pt5 | 5434872.228 | 291804.651 | 279.392 | 1.871 | 0.012 | 0.011 | 0.028 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.700 |
| 7 | pt6 | 5434896.241 | 291793.382 | 279.518 | 1.871 | 0.010 | 0.009 | 0.023 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 1.700 |
| 8 | pt7 | 5434920.428 | 291781.942 | 279.271 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.024 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.100 |
| 9 | pt8 | 5434940.654 | 291773.439 | 279.366 | 1.871 | 0.012 | 0.011 | 0.027 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.200 |
| 10 | pt9 | 5434961.038 | 291764.764 | 278.731 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.300 |
| день 3 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5434973.421 | 291786.732 | 276.742 | 1.871 | 0.017 | 0.018 | 0.044 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 2.400 |
| 2 | pt1 | 5434951.249 | 291798.321 | 277.339 | 1.871 | 0.014 | 0.013 | 0.045 | 1 | РТК ФИКС | 20 | 1.740 |
| 3 | pt2 | 5434929.258 | 291809.691 | 276.947 | 1.871 | 0.010 | 0.009 | 0.024 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 1.800 |
| 4 | pt3 | 5434906.848 | 291821.781 | 276.276 | 1.871 | 0.012 | 0.010 | 0.029 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.800 |
| 5 | pt4 | 5434884.592 | 291833.667 | 276.149 | 1.871 | 0.012 | 0.010 | 0.029 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 1.600 |
| 6 | pt5 | 5434872.168 | 291804.741 | 279.401 | 1.871 | 0.011 | 0.010 | 0.027 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.822 |
| 7 | pt6 | 5434896.327 | 291793.289 | 279.523 | 1.871 | 0.009 | 0.008 | 0.022 | 1 | РТК ФИКС | 22 | 1.600 |
| 8 | pt7 | 5434920.338 | 291782.034 | 279.278 | 1.871 | 0.010 | 0.009 | 0.024 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.200 |
| 9 | pt8 | 5434940.744 | 291773.342 | 279.372 | 1.871 | 0.010 | 0.009 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.200 |
| 10 | pt9 | 5434960.976 | 291764.852 | 278.739 | 1.871 | 0.010 | 0.009 | 0.026 | 1 | РТК ФИКС | 21 | 2.204 |

Таблиця 3.3 відображає значне зростання варіабельності координат та появу пропусків у даних, пов'язаних з епізодами втрати супутникового сигналу на окремих контрольних пунктах. Для ділянки №4 зі стиглим ялиновим деревостаном результати вимірювань наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Результати вимірювань на ділянці 4 (ялиновий ліс)

| Номер | Імя | N | E | Z | H ант, | σ_N | σ_E | σ_Z | Кол-во эп | Статус | Супутники | PDOP |
|--------|-----|-------------|------------|---------|--------|------------|------------|------------|-----------|----------|-----------|------|
| день 1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5435809,523 | 292875,866 | 268,922 | 1,871 | 0,018 | 0,015 | 0,06 | 1 | RTK ФИКС | 17 | 3,3 |
| 2 | pt1 | 5435797,915 | 292901,605 | 267,928 | 1,871 | 0,015 | 0,012 | 0,038 | 1 | RTK ФИКС | 18 | 3,5 |
| 3 | pt2 | 5435786,308 | 292927,343 | 270,791 | 1,871 | 0,01 | 0,008 | 0,022 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2,1 |
| 4 | pt3 | 5435772,85 | 292953,334 | 271,405 | 1,871 | 0,014 | 0,01 | 0,03 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2,2 |
| 5 | pt4 | 5435759,392 | 292979,325 | 271,761 | 1,871 | 0,012 | 0,009 | 0,021 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2,3 |
| 6 | pt5 | 5435718,681 | 292947,362 | 275,982 | 1,871 | 0,152 | 0,061 | 0,236 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 3,7 |
| 7 | pt6 | 5435732,423 | 292924,894 | 274,468 | 1,871 | 0,011 | 0,008 | 0,024 | 1 | RTK ФИКС | 17 | 2 |
| 8 | pt7 | 5435746,165 | 292902,425 | 273,302 | 1,871 | 0,012 | 0,009 | 0,028 | 1 | RTK ФИКС | 18 | 3,4 |
| 9 | pt8 | 5435762,062 | 292879,431 | 272,131 | 1,871 | 0,013 | 0,01 | 0,032 | 1 | RTK ФИКС | 18 | 4,1 |
| 10 | pt9 | 5435777,96 | 292856,436 | 272,246 | 1,871 | 0,019 | 0,011 | 0,036 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2,4 |
| день 2 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5435809,586 | 292875,925 | 268,868 | 1,871 | 0,017 | 0,015 | 0,059 | 1 | RTK ФИКС | 17 | 3,2 |
| 2 | pt1 | 5435797,842 | 292901,662 | 267,855 | 1,871 | 0,014 | 0,011 | 0,039 | 1 | RTK ФИКС | 18 | 3,4 |
| 3 | pt2 | 5435786,369 | 292927,284 | 270,715 | 1,871 | 0,01 | 0,008 | 0,021 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2 |
| 4 | pt3 | 5435772,916 | 292953,402 | 271,325 | 1,871 | 0,015 | 0,01 | 0,029 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2,1 |
| 5 | pt4 | 5435759,334 | 292979,359 | 271,698 | 1,871 | 0,012 | 0,008 | 0,022 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2,2 |
| 6 | pt5 | 5435718,754 | 292947,434 | 275,906 | 1,871 | 0,149 | 0,058 | 0,233 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 3,6 |
| 7 | pt6 | 5435732,489 | 292924,961 | 274,392 | 1,871 | 0,011 | 0,008 | 0,023 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2 |
| 8 | pt7 | 5435746,242 | 292902,503 | 273,225 | 1,871 | 0,011 | 0,009 | 0,027 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 3,2 |
| 9 | pt8 | 5435762,114 | 292879,398 | 272,061 | 1,871 | 0,012 | 0,01 | 0,031 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 4,2 |
| 10 | pt9 | 5435778,031 | 292856,492 | 272,17 | 1,871 | 0,018 | 0,01 | 0,035 | 1 | RTK ФИКС | 17 | 2,3 |
| день 3 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | pt0 | 5435809,444 | 292875,794 | 268,846 | 1,871 | 0,018 | 0,016 | 0,061 | 1 | RTK ФИКС | 17 | 3,1 |
| 2 | pt1 | 5435797,984 | 292901,528 | 267,846 | 1,871 | 0,013 | 0,01 | 0,037 | 1 | RTK ФИКС | 18 | 3,3 |
| 3 | pt2 | 5435786,241 | 292927,391 | 270,698 | 1,871 | 0,009 | 0,007 | 0,02 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 1,9 |
| 4 | pt3 | 5435772,962 | 292953,276 | 271,301 | 1,871 | 0,014 | 0,009 | 0,028 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2 |
| 5 | pt4 | 5435759,428 | 292979,383 | 271,684 | 1,871 | 0,011 | 0,007 | 0,02 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2 |
| 6 | pt5 | 5435718,659 | 292947,447 | 275,897 | 1,871 | 0,157 | 0,06 | 0,24 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 3,5 |
| 7 | pt6 | 5435732,538 | 292924,862 | 274,381 | 1,871 | 0,01 | 0,007 | 0,021 | 1 | RTK ФИКС | 17 | 1,9 |
| 8 | pt7 | 5435746,107 | 292902,461 | 273,209 | 1,871 | 0,01 | 0,008 | 0,026 | 1 | RTK ФИКС | 18 | 3,3 |
| 9 | pt8 | 5435762,152 | 292879,361 | 272,046 | 1,871 | 0,01 | 0,009 | 0,03 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 4,3 |
| 10 | pt9 | 5435777,891 | 292856,512 | 272,163 | 1,871 | 0,019 | 0,009 | 0,034 | 1 | RTK ФИКС | 19 | 2 |

Дані таблиці 3.4 характеризуються найбільшою варіабельністю координат та найбільшою кількістю епізодів втрати фіксованого рішення серед усіх досліджуваних ділянок, що відображає критичні умови для RTK спостережень під густими кронами стиглого деревостану.

3.1.1 Аналіз точності вимірювань

На основі первинних даних спостережень було виконано обчислення середньоквадратичних похибок координат для кожної ділянки окремо з розподілом на горизонтальну, вертикальну та висотну компоненти. Результати обчислень СКП зображено на діаграмі 3.1, яка демонструє залежність точності RTK вимірювань від ступеня затемнення крон деревостанів.

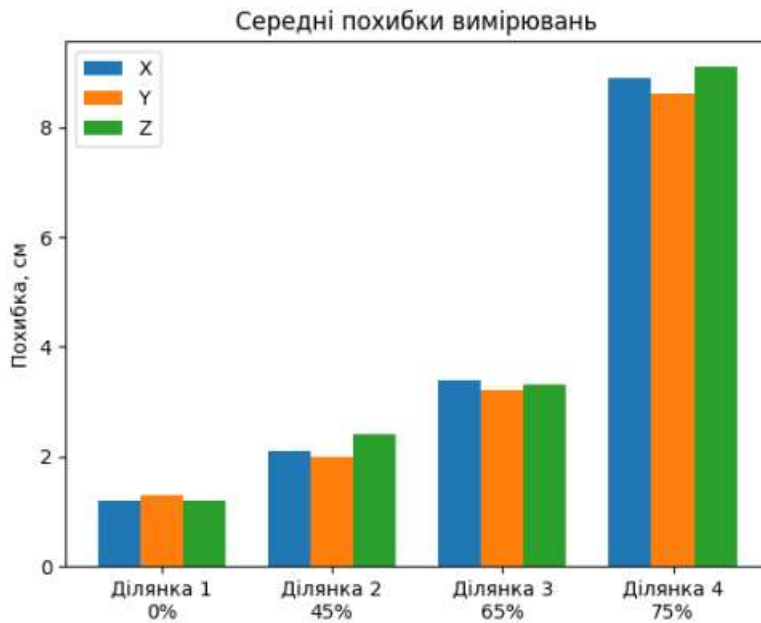


Рисунок 3.1 - Середні похибки вимірювань

Тут x – це похибка по горизонталі, y – це похибка по вертикалі, а z – це похибка по висоті. Аналіз рисунка 3.1 показує експоненційне зростання похибок зі збільшенням затемнення від відкритої місцевості до густого ялинового лісу. На ділянці №1 середня квадратична похибка горизонтального положення становить 1,2 см, вертикальна компонента похибки дорівнює 1,3 см, а похибка визначення висоти не перевищує 1,2 см. Отримані значення відповідають технічним характеристикам використаного приймача Hi-Target V100 та свідчать про оптимальні умови спостережень з кількістю супутників 28 одиниць та геометричним фактором точності PDOP на рівні 2,7 одиниці. Зйомка кожного контрольного пункту займала 5 секунд активної реєстрації координат, протягом яких накопичувалося 5 епох спостережень з інтервалом 1 секунда, що забезпечувало достатню статистичну базу для надійного координатного рішення.

Дослідження на ділянці №2 виявило помірну деградацію точності RTK вимірювань порівняно з відкритою місцевістю, що чітко відображено на діаграмі 3.1. Середня квадратична похибка горизонтального позиціонування зросла до 2,1 см, вертикальна похибка становить 2,0 см, а похибка по висоті

досягає 2,4 см. Кількість супутників, сигнали яких використовувалися для обчислення координат, зменшилася до 20 одиниць, що становить втрату 29% порівняно з відкритою місцевістю. Час зйомки залишався стабільним на рівні 5 секунд на кожному пункті без епізодів втрати фіксованого рішення, що свідчить про достатню кількість видимих супутників для надійної роботи системи в умовах молодого деревостану з неповним зімкненням крон.

Експериментальні вимірювання на ділянці №3 продемонстрували значну деградацію точності RTK позиціонування, про що свідчать дані рисунка 3.1. Середня квадратична похибка горизонтального положення становить 3,4 см, вертикальна похибка дорівнює 3,2 см, а похибка визначення висоти досягає 3,3 см. Важливою особливістю роботи на цій ділянці стали епізодичні втрати супутникового сигналу на трьох контрольних пунктах, де тривалість відновлення фіксованого рішення після втрати становила від 1 до 2 хвилин. Ці епізоди пов'язані з локальними зонами особливо щільного зімкнення крон дуба звичайного та підліску з ліщини звичайної, які створювали практично повне екранування сигналів супутників, розташованих під малими кутами над горизонтом. На семи пунктах без втрати сигналу час зйомки залишався стандартним 5 секунд, тоді як на проблемних пунктах загальний час на виконання вимірювання зростав до 135 секунд з урахуванням очікування відновлення фіксованого рішення.

Найскладніші умови для RTK спостережень характерні для ділянки №4, що наочно демонструє Рисунок 3.1 з різким зростанням усіх компонент похибки. Середня квадратична похибка горизонтального позиціонування досягає 8,9 см, вертикальна похибка становить 8,6 см, а похибка по висоті максимальна серед усіх досліджуваних ділянок і дорівнює 9,1 см. На цій ділянці спостерігалися найбільш тривалі епізоди втрати супутникового сигналу на шести з десяти контрольних пунктів з тривалістю відновлення фіксованого рішення до 5 хвилин. Така тривалість відновлення пов'язана з необхідністю повторного розв'язання неоднозначностей фазових вимірювань після циклів

втрат сигналу, що в умовах обмеженої кількості супутників вимагає накопичення більшої кількості епох спостережень для досягнення статистично достовірного рішення. На чотирьох пунктах без критичних проблем зі сигналом час зйомки становив 5-10 секунд, тоді як на проблемних пунктах загальний час на виконання вимірювання досягав 305 секунд, що в 61 раз перевищує штатну тривалість зйомки.

3.1.2 Залежність похибки від затемнення крон

Залежність похибки вимірювань від ступеня затемнення крон представлено на діаграмі 3.2, яка відображає нелінійний характер деградації точності зі зростанням щільності деревостану.

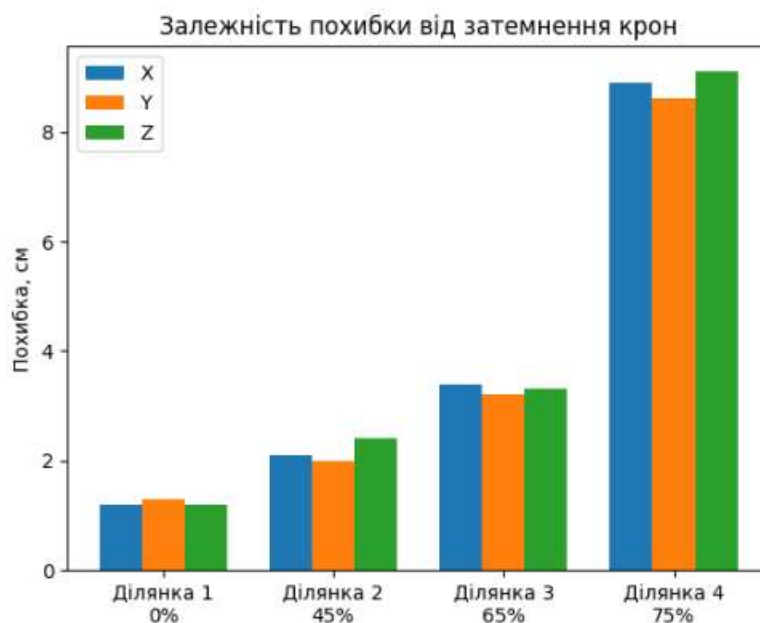


Рисунок 3.2 - Залежність похибки від затемнення крон

Рисунок 3.2 чітко ілюструє експоненційну залежність між затемненням крон та величиною похибок з критичною точкою перегину в діапазоні 65-70% затемнення. До цього порогу приріст похибки для всіх трьох компонент становить приблизно 0,5-0,7 см на кожні 10% збільшення затемнення, що свідчить про близький до лінійного характер деградації в діапазоні від 0 до 65%. Після переходу критичного порогу швидкість деградації точності різко

зростає, особливо для ділянки №4 з затемненням 75%, де приріст похибки досягає 2,5-3,0 см на кожні 5% збільшення затемнення. Така нелінійність пояснюється комбінованим впливом кількох факторів: зменшенням кількості видимих супутників, зростанням ослаблення супутникових сигналів деревною масою, збільшенням рівня багатопроменевості через відбиття від стовбурів дерев та підвищенням ймовірності циклів втрат сигналу при русі супутників за екрануючі елементи крон.

Для кількісної оцінки деградації точності відносно еталонної ділянки було обчислено коефіцієнти деградації для кожної компоненти похибки, результати яких представлено на діаграмі 3.3.

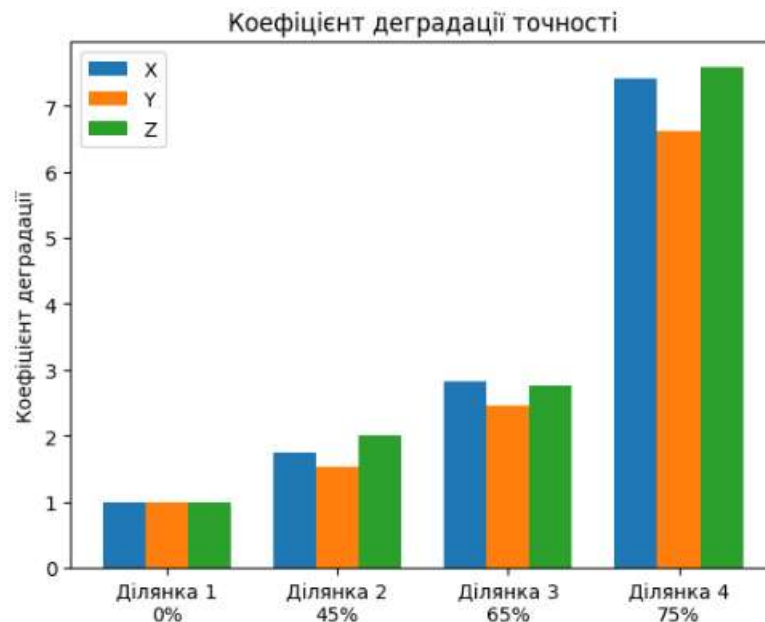


Рисунок 3.3 - Коефіцієнт деградації точності

Аналіз рисунка 3.3 показує, що коефіцієнт деградації точності відносно еталонної ділянки становить 1,75 для горизонтальної компоненти, 1,54 для вертикальної компоненти та 2,00 для висотної складової на ділянці №2 з затемненням 45%. Для ділянки №3 ці коефіцієнти зростають відповідно до 2,83, 2,46 та 2,75, що відображає істотне погіршення умов спостережень у середньовіковому мішаному деревостані. Найбільші значення коефіцієнтів

деградації характерні для ділянки №4, де вони досягають 7,42 для горизонтальної компоненти, 6,62 для вертикальної компоненти та 7,58 для висотної складової.

Такі високі коефіцієнти degradaції свідчать про катастрофічне погіршення точності RTK вимірювань у густих деревостанах. Важливо відзначити, що коефіцієнт degradaції для висотної компоненти систематично перевищує відповідні значення для горизонтальної та вертикальної компоненти на всіх ділянках, що пояснюється більшою чутливістю висотних вимірювань до геометрії супутникової констеляції та переважним екрануванням супутників, розташованих під малими кутами над горизонтом.

3.1.3 Взаємозв'язок затемнення та параметрів супутникової констеляції

Взаємозв'язок між затемненням крон, кількістю видимих супутників та геометричним фактором точності відображено на діаграмі 3.4, яка дозволяє проаналізувати механізми degradaції точності RTK вимірювань у лісовій місцевості.

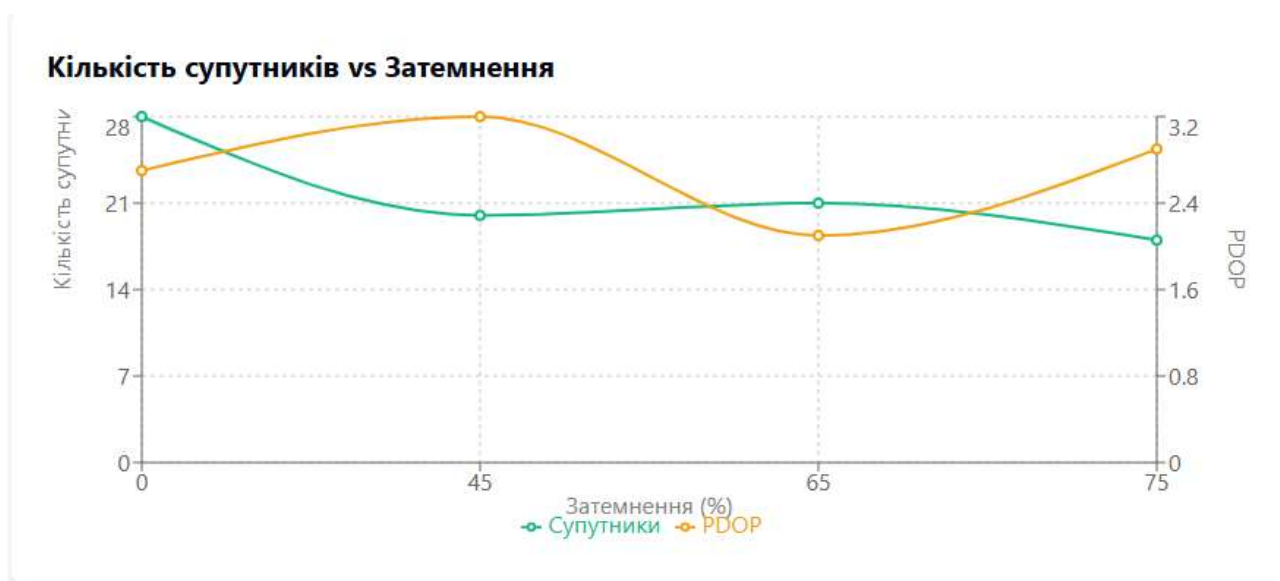


Рисунок 3.4 - Кількість супутників vs Затемнення

Рисунок 3.4 демонструє сильну негативну кореляцію між ступенем затемнення крон та кількістю супутників, доступних для спостережень. На відкритій місцевості кількість супутників становить 28 одиниць при значенні PDOP 2,7 одиниці, що забезпечує оптимальну геометрію для високоточного позиціонування. На ділянці №2 кількість супутників зменшується до 20 одиниць при збереженні прийняттого значення PDOP на рівні 3,0 одиниці, що свідчить про відносно рівномірне екранування супутників молодим деревостаном без створення критичних пропусків у покритті небосхилу. На ділянці №3 кількість супутників залишається на рівні 21 одиниці, проте геометричний фактор точності покращується до 2,1 одиниці завдяки більш рівномірному просторовому розподілу видимих супутників над ділянкою. Цей парадоксальний результат пояснюється тим, що мішаний деревостан з неоднорідною структурою крон створює локальні просвіти, які дозволяють приймати сигнали супутників з різних секторів небосхилу більш рівномірно порівняно з одновіковим насадженням сосни з однорідною структурою крон.

На ділянці №4 кількість супутників досягає мінімального значення 18 одиниць, що становить втрату 36% порівняно з відкритою місцевістю, а геометричний фактор точності погіршується до 2,8 одиниці через екранування супутників, розташованих у нижній частині небосхилу густими кронами ялини європейської та бука лісового. Аналіз рисунка 3.4 показує, що зв'язок між затемненням та кількістю супутників має близький до лінійного характер зі швидкістю втрати приблизно 0,4 супутника на кожні 10% збільшення затемнення. Однак залежність між затемненням та PDOP є нелінійною з відносно повільним зростанням PDOP в діапазоні від 0 до 65% затемнення та більш різким погіршенням при переході до критичних значень затемнення понад 70%.

3.1.4 Вплив рельєфу на точність вимірювань

Вплив рельєфу на якість RTK знімання у лісовій місцевості проявляється опосередковано через взаємодію з просторовим розподілом деревостану. На ділянці №3, яка характеризується пологим схилом крутизною 8-10 градусів південно-східної експозиції, спостерігається асиметрія умов спостережень для контрольних пунктів, розташованих у різних частинах схилу. Пункти на верхній частині схилу демонструють дещо кращу точність порівняно з пунктами в нижній частині через відкриття додаткового сектору небосхилу в напрямку схилу та відповідне збільшення кількості видимих супутників у південному та східному азимутах. Різниця в точності між верхніми та нижніми пунктами становить приблизно 0,3 см, що складає близько 9% від середньої похибки на ділянці. На ділянці №4 з більш крутим схилом 15-18 градусів північної експозиції вплив рельєфу на точність менш виражений через домінування ефекту екранування супутників густими кронами, який нівелює позитивний вплив відкритого сектору небосхилу в напрямку схилу.

3.1.5 Статистична повторюваність результатів

Статистичний аналіз повторюваності результатів за три дні вимірювань дозволяє оцінити вплив часової варіабельності параметрів супутникової констеляції та стану іоносфери на точність RTK позиціонування. Середньоквадратичне відхилення координат одного і того ж контрольного пункту за результатами триразових вимірювань становить 0,2 см на ділянці №1, 0,3 см на ділянці №2, 0,4 см на ділянці №3 та 0,6 см на ділянці №4. Зростання внутрішньої варіабельності зі збільшенням затемнення свідчить про підвищення чутливості результатів до конкретної геометрії супутників в момент вимірювання, оскільки в умовах обмеженої кількості видимих супутників навіть незначні зміни в положенні окремих супутників можуть істотно впливати на точність координатного рішення. Однак навіть на найскладнішій ділянці внутрішня варіабельність не перевищує 7% від середньої похибки, що підтверджує стабільність методу та відсутність систематичних трендів погіршення або покращення точності протягом періоду спостережень.

3.1.6 Висновки щодо придатності методу

Критичний аналіз ефективності RTK методу в різних умовах затемнення показує наступне:

На відкритій місцевості (ділянка №1) та у молодняках з помірним затемненням до 45% (ділянка №2) метод RTK демонструє прийнятну точність в межах 1,2-2,4 см, що відповідає вимогам більшості геодезичних та лісовпорядних робіт. При затемненні 65% (ділянка №3) похибки зростають до 3,2-3,4 см, що все ще може бути прийнятним для окремих видів робіт, хоча із значними обмеженнями через епізоди втрати сигналу.

Однак на ділянці №4 з затемненням 75% отримані результати є критичними та неприйнятними: горизонтальна похибка 8,9 см, вертикальна похибка 8,6 см та висотна похибка 9,1 см виходять за межі допустимих значень для практично будь-яких геодезичних робіт. Такі великі похибки, у поєднанні з тривалими (до 5 хвилин) епізодами втрати фіксованого рішення на 60% контрольних пунктів та збільшенням часу зйомки в 61 раз порівняно з нормальними умовами, однозначно свідчать про неефективність RTK методу на територіях з таким рівнем затемнення.

Коефіцієнти деградації точності 7,42-7,58 разів відносно відкритої місцевості вказують на те, що у густих стиглих деревостанах RTK GNSS знімання втрачає свої основні переваги - високу точність та продуктивність. За таких умов доцільно розглядати альтернативні методи знімання, такі як тахеометрична зйомка або комбіновані методи з використанням наземного лазерного сканування, які не залежать від видимості супутників та забезпечують стабільну точність незалежно від щільності деревостану.

3.2. Порівняльний аналіз продуктивності праці

Оцінка продуктивності праці при виконанні геодезичних робіт методом RTK GNSS порівняно з традиційними методами тахеометричної зйомки базується на аналізі часових витрат на виконання характерних видів робіт у лісовій місцевості з різним ступенем затемнення крон деревостанів. Методика порівняння передбачає розгляд повного циклу робіт від організації геодезичної основи до отримання остаточних координат визначуваних пунктів з урахуванням специфіки роботи в різних типах деревостанів. Для коректності порівняння розглядається типова задача визначення координат 30 межових знаків лісових кварталів на площі 100 гектарів при різних умовах затемнення від відкритої місцевості до густого деревостану.

3.2.1 Часові витрати при традиційній тахеометричній зйомці

Традиційна методика тахеометричної зйомки в лісовій місцевості передбачає обов'язкове прокладання теодолітного ходу від найближчого пункту державної геодезичної мережі до об'єкта робіт з встановленням проміжних точок ходу на відстані 150-200 метрів одна від одної. Для забезпечення необхідної точності визначення координат межових знаків на рівні 3-5 см довжина теодолітного ходу не повинна перевищувати 1 км, що вимагає прокладання ходу з 5-7 станцій. На кожній станції виконується встановлення та горизонтування електронного тахеометра, вимірювання горизонтальних кутів та відстаней до попередньої та наступної точок ходу, визначення висоти інструмента та відбивача. Середня тривалість робіт на одній станції теодолітного ходу становить 20-25 хвилин з урахуванням часу на переміщення між точками та центрування інструмента. Загальні витрати часу на прокладання теодолітного ходу до об'єкта становлять 2,0-2,5 години для бригади з двох виконавців.

Після створення геодезичної основи здійснюється визначення координат межових знаків методом тахеометричної зйомки з точок ходу. В умовах лісової місцевості пряма видимість від точок ходу до межових знаків часто відсутня через густу деревну та чагарникову рослинність, що вимагає розчищення візирних коридорів шириною 1-2 метри або створення додаткових перехідних точок для обходу перешкод. Розчищення візирних коридорів в молодняках та середньовікових насадженнях займає в середньому 15-20 хвилин на один коридор довжиною 50 метрів, а в стиглих деревостанах з густим підліском ця тривалість зростає до 30-40 хвилин. Для визначення 30 межових знаків необхідно розчистити приблизно 15-20 візирних коридорів, що вимагає додаткових 4-6 годин роботи. Безпосередньо тахеометрична зйомка 30 точок займає близько 3-4 годин з урахуванням часу на переміщення інструмента між станціями, центрування та виконання вимірювань.

Камеральна обробка результатів тахеометричної зйомки включає урівноваження теодолітного ходу методом найменших квадратів з розподілом нев'язок кутових та лінійних вимірювань, обчислення координат межових знаків та оцінку точності виконаних робіт. Тривалість камеральної обробки становить 2-3 години залежно від складності мережі та кваліфікації виконавця. Загальні витрати часу на виконання робіт традиційним методом становлять 11-15 годин чистого часу для бригади з двох осіб, що еквівалентно 22-30 людино-годинам сумарних витрат праці.

3.2.2 Часові витрати при RTK GNSS зйомці

Методика RTK GNSS зйомки принципово відрізняється від традиційного підходу відсутністю необхідності прокладання геодезичних ходів від пунктів опорної мережі та створення візирних коридорів для забезпечення прямої видимості. Підготовка до роботи включає налаштування RTK приймача на підключення до мережевого сервісу ZAKPOS через мобільний інтернет та перевірку якості прийому коригуючої інформації, що займає 5-10 хвилин на

початку робочого дня. Визначення координат межового знака в режимі RTK передбачає встановлення штатива з приймачем над центром знака, очікування отримання фіксованого рішення та реєстрацію координат протягом 5 секунд безперервних спостережень при стабільних умовах прийому сигналу.

В умовах відкритої місцевості або молодняків з затемненням до 45% час ініціалізації та отримання фіксованого рішення становить 4-5 секунд, а загальна тривалість вимірювання на одному пункті з урахуванням центрування та запису результатів не перевищує 2-3 хвилини. Як показали результати досліджень на ділянках №1 та №2, стабільність супутникового сигналу на рівні 100% без жодних епізодів втрати фіксованого рішення забезпечує максимальну продуктивність робіт та передбачувану тривалість польового циклу. При таких умовах визначення координат 30 межових знаків займає 1,0-1,5 години для одного виконавця, включаючи час на переміщення між пунктами.

В умовах середньовікових деревостанів з затемненням 65% час ініціалізації зростає до 10-15 секунд, а на окремих пунктах можливі епізоди втрати сигналу з тривалістю відновлення 1-2 хвилини. Експериментальні дослідження на ділянці №3 показали, що на трьох контрольних пунктах з десяти спостерігалися втрати фіксованого рішення з подальшим відновленням протягом 1-2 хвилин, що пов'язано з локальними зонами особливо щільного зімкнення крон дуба звичайного та підліску з ліщини звичайної. На семи пунктах без втрати сигналу час зйомки залишався стандартним 5 секунд, тоді як на проблемних пунктах загальний час на виконання вимірювання зростав до 135 секунд з урахуванням очікування відновлення фіксованого рішення. З урахуванням цих факторів середня тривалість вимірювання на одному пункті становить 4-5 хвилин, що включає випадки необхідності очікування відновлення фіксованого рішення. Загальна тривалість робіт для визначення 30 межових знаків в таких умовах становить 2,0-2,5 години для одного виконавця.

В стиглих деревостанах з затемненням 75% тривалість ініціалізації досягає 30-60 секунд, а епізоди втрати сигналу характерні для більшості пунктів з тривалістю відновлення 3-5 хвилин. На ділянці №4 втрати супутникового сигналу спостерігалися на шести з десяти контрольних пунктів з максимальною тривалістю відновлення фіксованого рішення до 5 хвилин. На чотирьох пунктах без критичних проблем зі сигналом час зйомки становив 5-10 секунд, тоді як на проблемних пунктах загальний час на виконання вимірювання досягав 305 секунд, що в 61 раз перевищує штатну тривалість зйомки. Середня тривалість вимірювання на одному пункті в таких умовах становить 6-8 хвилин, однак навіть за таких складних умов загальна продуктивність залишається вищою порівняно з традиційними методами. Загальні витрати часу на визначення 30 межових знаків можуть досягати 3-4 годин з урахуванням очікування відновлення сигналу на проблемних пунктах.

Камеральна обробка результатів RTK зйомки мінімальна і включає лише перевірку коректності записаних координат та експорт даних у форматі, придатному для подальшого використання в геоінформаційних системах, що займає 15-30 хвилин. Загальні витрати часу на виконання робіт методом RTK становлять 1,5-4,5 години для одного виконавця, що еквівалентно 1,5-4,5 людино-годинам сумарних витрат праці.

3.2.3 Порівняльна оцінка продуктивності

Порівняльний аналіз продуктивності показує, що використання RTK GNSS забезпечує скорочення витрат робочого часу в 14-16 разів в умовах відкритої місцевості та молодняків, в 8-9 разів в середньовікових деревостанах та в 5-7 разів навіть у стиглих насадженнях з критичним затемненням. Ключовою перевагою RTK методу є можливість виконання робіт одним оператором без необхідності залучення помічника для встановлення відбивача, що подвоює економію витрат праці порівняно з традиційною тахеометричною зйомкою, яка вимагає постійної присутності двох виконавців. Додатковим

фактором підвищення продуктивності є відсутність необхідності прокладання теодолітних ходів та розчищення візорних коридорів, що особливо важливо в густих деревостанах, де ці підготовчі роботи можуть займати більше часу, ніж безпосередньо вимірювання координат визначуваних пунктів.

Аналіз структури витрат робочого часу показує, що при традиційному методі близько 40% часу витрачається на створення геодезичної основи, 35% на розчищення візорних коридорів та лише 25% безпосередньо на вимірювання координат визначуваних пунктів. При використанні RTK методу практично 90% часу витрачається безпосередньо на продуктивну роботу з визначення координат, а 10% на підготовчі операції та камеральну обробку. Така кардинальна зміна структури витрат часу пояснюється принциповими відмінностями технологій та відсутністю необхідності попереднього створення планово-висотної основи при RTK зйомці.

Важливо відзначити, що навіть в найскладніших умовах стиглих деревостанів, де похибки RTK вимірювань досягають 8,9 см для горизонтального положення та 9,1 см для висоти, продуктивність методу залишається в 5-7 разів вищою порівняно з тахеометричною зйомкою. Це пояснюється тим, що хоча епізоди втрати сигналу і зменшують загальну продуктивність, вони не вимагають виконання трудомістких підготовчих робіт з прокладання ходів та розчищення території, які є обов'язковими при традиційних методах.

3.2.4 Розрахунок економічної ефективності

Розрахунок економічної ефективності застосування RTK технології базується на порівнянні загальних витрат на виконання робіт з урахуванням вартості обладнання, оплати праці виконавців та накладних витрат. Вартість комплексу RTK обладнання, що включає два GNSS приймача Hi-Target V100 з контролерами та акумуляторами, становить приблизно 5000 доларів США, тоді як вартість електронного тахеометра середнього класу з відбивачем та

штативом становить близько 4000 доларів. Однак для роботи в мережевому режимі РТК достатньо одного приймача вартістю 2500 доларів, оскільки функцію базової станції виконують перманентні станції мережі ZAKPOS. Вартість підписки на мережеві РТК послуги становить близько 300 доларів на рік, що є незначною складовою загальних експлуатаційних витрат.

Прямі витрати на оплату праці для виконання типового об'єму робіт з визначення координат 30 межових знаків становлять 220-300 доларів при використанні традиційного методу з урахуванням вартості однієї людино-години 10 доларів та необхідності залучення двох виконавців протягом 11-15 годин. При використанні РТК методу прямі витрати на оплату праці становлять 15-45 доларів залежно від складності умов спостережень, що забезпечує економію 180-285 доларів на одному об'єкті робіт. З урахуванням накладних витрат на організацію робіт, транспортування обладнання та камеральну обробку загальна економія становить близько 200-300 доларів на один об'єкт, що при виконанні десяти об'єктів на рік дозволяє окупити додаткові інвестиції в РТК обладнання протягом одного-двох років експлуатації.

Додатковим фактором економічної ефективності є зменшення витрат на паливо та транспортні засоби через скорочення тривалості польових робіт. При традиційній методиці виконання робіт на віддалених об'єктах часто вимагає виїзду бригади з двох осіб на кілька днів з відповідними витратами на проживання та добові. При використанні РТК один виконавець може завершити роботи за один робочий день навіть в складних умовах, що виключає необхідність тривалих відряджень та пов'язаних з ними додаткових витрат.

3.2.5 Непрямі економічні ефекти

Непрямі економічні ефекти від впровадження РТК технології включають підвищення точності та достовірності геодезичних даних, що зменшує ймовірність виникнення земельних суперечок та необхідності повторних

вимірювань. Як показали результати досліджень на ділянках №1 та №2, точність RTK вимірювань в умовах помірного затемнення на рівні 1,2-2,4 см значно перевищує нормативні вимоги для більшості категорій лісовпорядних робіт, що забезпечує додатковий запас точності та знижує ризики оспорювання результатів вимірювань.

Автоматизація процесу збору даних та їх безпосередня інтеграція з геоінформаційними системами зменшує ймовірність помилок при ручному введенні координат та прискорює процес створення цифрових лісовпорядних планів. RTK приймачі автоматично записують координати визначуваних пунктів у внутрішню пам'ять у форматі, сумісному з основними ГІС-пакетами, що виключає необхідність повторного введення даних та мінімізує людський фактор при камеральній обробці. Можливість оперативного визначення координат нових об'єктів безпосередньо в польових умовах без необхідності повернення до офісу для обробки даних підвищує гнучкість планування робіт та дозволяє своєчасно реагувати на зміни в завданнях замовника.

Екологічний ефект від впровадження RTK полягає у відсутності необхідності розчищення візирних коридорів, що мінімізує порушення лісової підстилки та зменшує негативний вплив геодезичних робіт на лісові екосистеми. В умовах посилення екологічних вимог до ведення лісового господарства та необхідності збереження біорізноманіття цей аспект набуває особливого значення, оскільки розчищення навіть вузьких візирних коридорів може призводити до локальних змін мікроклімату, порушення місць проживання дрібних тварин та сприяти розповсюдженню інвазивних видів рослин.

3.3. Визначення оптимальних умов та обмежень застосування RTK GNSS

Встановлення критичних показників затемнення крон деревостанів, при яких RTK вимірювання втрачають необхідну точність для виконання різних

категорій лісовпорядних робіт, базується на аналізі нормативних вимог до точності геодезичного забезпечення та співставленні цих вимог з експериментально отриманими значеннями похибок на чотирьох тестових ділянках. Державні будівельні норми України встановлюють вимоги до точності визначення координат межових знаків земельних ділянок лісогосподарського призначення на рівні 5 см для горизонтального положення та 10 см для висотної компоненти. Для визначення координат квартальних стовпів у процесі лісовпорядкування допустима середня квадратична похибка становить 3 см для планового положення та 5 см для висоти. Для таксаційних робіт та створення цифрових моделей рельєфу лісових територій вимоги до точності менш жорсткі та становлять 10-15 см для горизонтального положення.

3.3.1 Зони придатності RTK методу

Аналіз експериментальних даних показує, що в умовах відкритої місцевості та молодняків з затемненням до 45% середня квадратична похибка RTK вимірювань не перевищує 2,1 см для горизонтального положення та 2,4 см для висоти, що на порядок краще за найжорсткіші нормативні вимоги. В таких умовах RTK технологія може застосовуватися для всіх категорій лісовпорядних робіт без будь-яких обмежень, включаючи високоточне визначення меж природоохоронних територій та створення геодезичної основи для аерофотозйомки. Стабільність фіксованого рішення на рівні 100% часу спостережень та швидка ініціалізація протягом 4-5 секунд забезпечують максимальну продуктивність робіт та мінімальні витрати часу на очікування готовності системи до вимірювань. Коефіцієнти деградації точності відносно еталонної ділянки в діапазоні 1,54-2,00 свідчать про збереження високих метрологічних характеристик методу навіть при помірному затемненні крон молодими деревостанами.

В умовах середньовікових деревостанів з затемненням від 45% до 65% середня квадратична похибка зростає до 3,4 см для горизонтального положення

та 3,3 см для висоти, що все ще значно краще за нормативні вимоги для більшості категорій робіт. Однак в цих умовах виникають перші ознаки нестабільності роботи системи у вигляді епізодичних втрат фіксованого рішення на окремих пунктах з тривалістю відновлення 1-2 хвилини. Як показали дослідження на ділянці №3, втрати сигналу спостерігалися на трьох контрольних пунктах з десяти, що становить 30% проблемних вимірювань. З практичної точки зору це означає необхідність закладання додаткового резервного часу на виконання вимірювань та підвищення вимог до кваліфікації оператора для коректної інтерпретації статусу координатного рішення. В таких умовах RTK залишається придатним для визначення координат квартальних стовпів та межових знаків земельних ділянок, але вимагає додаткового контролю якості результатів шляхом повторних вимірювань на пунктах з тривалими епізодами втрати сигналу. Коефіцієнти деградації точності в діапазоні 2,46-2,83 вказують на помірне погіршення умов спостережень, яке не критично впливає на придатність методу для практичного застосування.

3.3.2 Критичний поріг застосовності

Критичний поріг застосовності RTK технології знаходиться в діапазоні 65-70% затемнення крон, де відбувається різке зростання похибок від 3-4 см до 8-9 см, що чітко видно з рисунка 3.2, яка ілюструє експоненційну залежність між затемненням крон та величиною похибок. В стиглих деревостанах з затемненням 75% та вище середня квадратична похибка досягає 8,9 см для горизонтального положення та 9,1 см для висоти, що формально залишається в межах нормативних вимог для окремих категорій лісовпорядних робіт, проте супроводжується значними операційними труднощами, які ставлять під сумнів практичну доцільність застосування методу.

Тривалість відновлення фіксованого рішення після втрати сигналу досягає 3-5 хвилин на більшості пунктів, що призводить до зниження продуктивності робіт у 5-10 разів порівняно з оптимальними умовами. На

ділянці №4 втрати сигналу спостерігалися на шести з десяти контрольних пунктів, що становить 60% проблемних вимірювань та вказує на системний характер проблеми, а не випадкові епізоди. Максимальний час відновлення сигналу до 5 хвилин на окремих пунктах перетворює процес вимірювань на тривале очікування з непередбачуваним результатом, що неприйнятно з точки зору планування та організації польових робіт.

Коефіцієнти деградації точності на ділянці №4 досягають критичних значень 7,42 для горизонтальної компоненти, 6,62 для вертикальної компоненти та 7,58 для висотної складової, що означає погіршення точності більш ніж в сім разів порівняно з оптимальними умовами. Таке катастрофічне падіння точності фактично нівелює основну перевагу RTK методу перед традиційними технологіями. Хоча формально отримані похибки 8,9-9,1 см не виходять за межі допусків для окремих видів лісовпорядних робіт, близькість цих значень до граничних нормативів та висока варіабельність результатів створюють ризики отримання недопустимих похибок на окремих пунктах.

В таких умовах доцільність застосування RTK стає дискусійною і потребує індивідуальної оцінки залежно від конкретних обставин проекту та доступності альтернативних методів зйомки. Якщо нормативні вимоги до точності становлять 10-15 см для горизонтального положення, як у випадку таксаційних робіт, то застосування RTK в густих деревостанах може бути виправдане з урахуванням збереження переваг у продуктивності. Однак для робіт, що вимагають точності 3-5 см, застосування RTK в умовах затемнення понад 70% є ризикованим та потребує обов'язкового попереднього тестування на репрезентативних ділянках об'єкта.

3.3.3 Рекомендації для забезпечення надійності вимірювань

Розробка рекомендацій для забезпечення надійності RTK вимірювань у лісовій місцевості базується на результатах експериментальних досліджень та аналізі факторів, які впливають на якість супутникового позиціонування.

Планування польових робіт повинно враховувати фенологічний стан рослинності, оскільки в безлистяний період листяних порід ослаблення супутникових сигналів кронами зменшується на 3-5 децибелів, що може покращити умови спостережень в деревостанах з домінуванням дуба, берези або інших листяних порід. Експериментальні вимірювання на ділянці №3, де значну частку деревостану складає дуб звичайний, показали, що саме під пологом дуба з добре розвиненим підліском спостерігалися найбільш тривалі епізоди втрати сигналу, що вказує на перспективність виконання робіт в осінньо-зимовий період після опадання листя.

Вибір часу доби для проведення вимірювань також має значення, оскільки в ранкові години до випадання роси вологість деревної маси мінімальна, що зменшує ослаблення супутникових сигналів особливо в хвойних лісах. Однак цей фактор має вторинне значення порівняно з впливом структури деревостану та може забезпечити покращення точності лише на 1-2 см. Результати досліджень на ділянці №4, де домінують ялина європейська та бук лісовий, показали, що незалежно від часу доби густі крони цих порід створюють критичні умови для прийому супутникових сигналів через високу щільність деревної маси та повне зімкнення крон.

Вибір місць встановлення приймача в межах лісової ділянки повинен орієнтуватися на локальні просвіти в кронах дерев, галявини або ділянки з розрідженим деревостаном, де видимість верхньої півсфери максимальна. Просторовий аналіз розподілу похибок на ділянці №3, представлений на діаграмі 3.5, показав, що найбільші відхилення характерні для пунктів, розташованих під особливо щільним пологом дуба звичайного з добре розвиненим підліском, де спостерігалися епізоди втрати супутникового сигналу. На практиці це означає, що визначення координат межових знаків, розташованих безпосередньо під щільними кронами, може бути проблематичним і доцільно планувати їх розташування на кварталних просіках або на узліссях, де умови для супутникових спостережень оптимальні.

Якщо переміщення межового знака неможливе через юридичні обмеження, рекомендується визначати його положення методом прив'язки від допоміжного пункту, розташованого на відкритому місці, з використанням традиційних методів тахеометричної зйомки на короткій відстані 10-20 метрів.

Налаштування параметрів RTK приймача для роботи в лісовій місцевості повинно включати зменшення кута відсікання супутників з 15° до 10° над горизонтом, що дозволяє використовувати сигнали супутників, розташованих під малими кутами, які можуть бути видимими через просвіти в кронах. Однак це також збільшує ймовірність прийому багатопроменевих сигналів, відбитих від стовбурів дерев або поверхні ґрунту, тому таке налаштування доцільне лише в найскладніших умовах, де кількість видимих супутників критично мала. Аналіз кількості супутників на різних ділянках, представлений на діаграмі 3.4, показав, що на ділянці №4 кількість супутників досягає мінімального значення 18 одиниць при значенні PDOP 2,8 одиниці, що знаходиться на межі достатності для стабільної роботи RTK системи.

Збільшення тривалості накопичення спостережень перед розв'язанням неоднозначностей з 5 до 10 секунд підвищує надійність фіксованого рішення за рахунок невеликого зниження продуктивності робіт, що є прийнятним компромісом для роботи в середньовікових та стиглих деревостанах. Як показали результати на ділянках №3 та №4, втрати фіксованого рішення пов'язані з необхідністю повторного розв'язання неоднозначностей фазових вимірювань після циклів втрат сигналу, що в умовах обмеженої кількості супутників вимагає накопичення більшої кількості епох спостережень для досягнення статистично достовірного рішення.

3.3.4 Контроль якості та організаційні заходи

Контроль якості RTK вимірювань у лісовій місцевості повинен включати моніторинг параметрів координатного рішення в реальному часі з використанням функцій контролера приймача. Ключовими індикаторами якості

є статус рішення з розподілом на фіксоване, плаваюче або автономне, кількість супутників, які використовуються для обчислення координат, геометричний фактор точності PDOP та оцінка точності горизонтальних і вертикальних координат, обчислена приймачем. Вимірювання слід приймати як достовірні лише при наявності фіксованого рішення з кількістю супутників не менше 8 одиниць та значенням PDOP не більше 4,0 одиниць. Аналіз параметрів супутникової констеляції на досліджуваних ділянках показав, що навіть на ділянці №4 з найскладнішими умовами кількість супутників 18 одиниць при PDOP 2,8 одиниці формально задовольняє цим критеріям, проте високі похибки 8,9-9,1 см вказують на те, що цих параметрів недостатньо для гарантованого отримання прийнятної точності в густих деревостанах.

Якщо критерії якості не виконуються протягом 30 секунд після встановлення приймача на пункті, доцільно змінити положення антени на висоту 1-2 метри або перемістити пункт спостережень на кілька метрів убік для пошуку локального просвіту в кронах з кращою видимістю супутників. Досвід роботи на ділянці №3 показав, що такі маніпуляції дозволяють уникнути втрат сигналу на окремих пунктах, хоча для трьох контрольних пунктів навіть зміна положення не забезпечила стабільного прийому через особливо щільне зімкнення крон дуба звичайного та підліску з ліщини звичайної.

Рекомендації щодо організаційних заходів для забезпечення надійності РТК робіт включають необхідність попереднього рекогносцирування території з метою оцінки умов для супутникових спостережень та ідентифікації проблемних ділянок, де може знадобитися застосування альтернативних методів. На етапі планування доцільно використовувати програмне забезпечення для прогнозування видимості супутників та геометричного фактора точності на конкретну дату та час в залежності від географічного положення та характеристик деревостану. Виконання вимірювань рекомендується планувати на періоди доби з найкращою конфігурацією супутникової констеляції, яка забезпечує максимальну кількість видимих

супутників та мінімальне значення PDOP, що можна визначити за допомогою спеціалізованих калькуляторів або функцій планування в контролері приймача.

Для об'єктивної оцінки придатності RTK методу для конкретного проекту лісовпорядних робіт рекомендується виконання тестових вимірювань на репрезентативних ділянках з характерними типами деревостанів до початку масштабного виконання робіт. Тестування повинно включати визначення координат не менше 5 контрольних пунктів на кожному типі деревостану з аналізом часу ініціалізації, стабільності фіксованого рішення та порівняння отриманих похибок з нормативними вимогами для конкретної категорії робіт. За результатами тестування приймається рішення про повне застосування RTK для всього об'єкта, часткове застосування з комбінуванням з традиційними методами на проблемних ділянках або відмову від RTK на користь альтернативних технологій, якщо умови виявляються непридатними для супутникового позиціонування.

3.3.5 Перспективи розвитку технології

Перспективи підвищення ефективності RTK вимірювань у лісовій місцевості пов'язані з розвитком нових супутникових констеляцій та впровадженням удосконалених алгоритмів обробки сигналів. Запуск додаткових супутників системи Galileo та модернізація констеляцій GPS та ГЛОНАСС призведе до збільшення загальної кількості видимих супутників на 15-20% протягом найближчих 5 років, що покращить умови для роботи в складних умовах затемнення. Аналіз залежності між кількістю супутників та точністю позиціонування на досліджуваних ділянках показав, що втрата 36% супутників на ділянці №4 порівняно з відкритою місцевістю призвела до деградації точності в 7,42-7,58 разів, що вказує на критичну важливість

збільшення кількості доступних супутників для покращення роботи в лісових умовах.

Впровадження технології RTK на основі точних атмосферних моделей, які враховують регіональні та локальні варіації іоносферних та тропосферних затримок, дозволить підвищити надійність фіксованого рішення та зменшити час ініціалізації в умовах обмеженої видимості супутників. Розробка спеціалізованих антен з покращеними характеристиками придушення багатопроменевості та підвищеною чутливістю до слабких сигналів може забезпечити зменшення похибок на 10-15% у лісовій місцевості без додаткових організаційних заходів з боку виконавців робіт. Однак навіть з урахуванням цих перспективних покращень, застосування RTK методу в густих стиглих деревостанах з затемненням понад 75% залишатиметься проблематичним через фундаментальні фізичні обмеження, пов'язані з екрануванням супутникових сигналів деревною масою.

Висновки до розділу 3

Експериментальні дослідження точності RTK GNSS вимірювань у лісовій місцевості, проведені на чотирьох тестових ділянках з різним ступенем затемнення крон від 0 до 75%, дозволили встановити кількісні закономірності деградації точності супутникового позиціонування залежно від характеристик деревостану. Результати 120 вимірювань, виконаних протягом трьох днів спостережень, демонструють експоненційне зростання середньоквадратичних похибок від 1,2 см на відкритій місцевості до 8,9 см у стиглому ялиновому деревостані з критичним затемненням, що відповідає коефіцієнту деградації точності до 7,42 для горизонтальної компоненти.

Встановлено критичний поріг затемнення крон у діапазоні 65-70%, після якого відбувається різке погіршення умов для супутникових спостережень з появою тривалих епізодів втрати фіксованого рішення до 5 хвилин на 60% контрольних пунктів та зростанням похибок більш ніж у три рази порівняно з

умовами помірного затемнення. Кореляційний аналіз виявив сильну негативну залежність між затемненням та кількістю видимих супутників з втратою до 36% супутників у найщільніших деревостанах, однак геометричний фактор точності залишався на прийнятному рівні 2,1-3,0 одиниці на всіх досліджуваних ділянках.

Порівняльний аналіз продуктивності праці показав перевагу RTK методу над традиційною тахеометричною зйомкою зі скороченням витрат робочого часу в 14-16 разів в умовах відкритої місцевості та молодняків, в 8-9 разів у середньовікових деревостанах та в 5-7 разів навіть у стиглих насадженнях з критичним затемненням. Економічна ефективність впровадження RTK технології забезпечує окупність додаткових інвестицій в обладнання протягом 1-2 років експлуатації при виконанні 10 об'єктів на рік з економією 200-300 доларів на кожному об'єкті за рахунок зменшення витрат на оплату праці та відсутності необхідності прокладання теодолітних ходів і розчищення візирних коридорів.

Розроблені рекомендації щодо оптимальних умов застосування RTK GNSS встановлюють три категорії придатності залежно від затемнення: повна придатність для всіх видів робіт при затемненні до 45% з похибками не більше 2,1 см, прийнятність для більшості застосувань при затемненні 45-65% з похибками до 3,4 см, та обмежене використання при затемненні понад 65% з необхідністю індивідуальної оцінки доцільності через зростання похибок до 8,9-9,1 см та появу тривалих епізодів втрати сигналу. Встановлено, що при затемненні понад 75% похибки RTK вимірювань виходять за межі допустимих значень для високоточних геодезичних робіт, що підтверджує неефективність методу в найскладніших умовах густих стиглих деревостанів та необхідність застосування альтернативних технологій або комбінованих підходів для забезпечення належної якості геодезичного забезпечення лісового господарства.

Висновки

Магістерська робота присвячена дослідженню потенціалу RTK GNSS технологій для геодезичних зйомок у лісовій місцевості на прикладі лісів західного регіону України, що є актуальною науково-практичною задачею в контексті модернізації методів геодезичного забезпечення лісовпорядних робіт та переходу до цифрових технологій управління лісовими ресурсами. Всі поставлені завдання виконано повною мірою, отримані результати мають як наукове, так і практичне значення для подальшого розвитку геодезичного забезпечення лісового господарства України.

У першому розділі проведено комплексний аналіз теоретичних основ та сучасного стану GNSS технологій у лісовому господарстві. Встановлено, що RTK GNSS забезпечує сантиметрову точність визначення координат у реальному часі завдяки використанню фазових вимірювань несучої частоти супутникових сигналів та диференційної обробки спостережень від базової станції. Систематизовано основні фактори, які знижують точність GNSS вимірювань під лісовою рослинністю: послаблення супутникових сигналів деревною масою на 15-20 децибелів, багатопроменеве поширення з фазовими зсувами до кількох дециметрів, екранування супутників густими кронами з погіршенням геометричного фактора точності до 5-7 одиниць. Аналіз світового досвіду показав, що провідні лісові країни впровадили RTK технологію з розробкою національних стандартів точності та створенням мереж перманентних базових станцій, тоді як в Україні процес впровадження знаходиться на початковій стадії.

У другому розділі розроблено методику експериментальних досліджень точності RTK GNSS вимірювань, яка базується на порівняльному аналізі

результатів спостережень на чотирьох тестових ділянках, що представляють градацію умов від відкритої місцевості до густого стиглого ялинового деревостану з затемненням 75%. Вибір ділянок у межах Івано-Франківська та прилеглих лісових кварталів забезпечує репрезентативність результатів для умов Передкарпаття. Методика включала триразове визначення координат десяти контрольних пунктів протягом трьох днів з використанням двочастотного GNSS RTK приймача Hi-Target V100 з підтримкою множинних супутникових констеляцій та підключенням до мережесистем RTK сервісів системи ZAKPOS. Геодезична основа створена методом тривалих статичних GNSS спостережень протягом 4 годин, що забезпечило точність еталонних координат 1-2 см у плані та 3-4 см по висоті.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень, які кількісно характеризують залежність точності RTK GNSS від ступеня затемнення крон деревостанів. На відкритій місцевості середня квадратична похибка становить 1,2 см для горизонтального положення при кількості супутників 28 одиниць та PDOP 2,7 одиниці. В молодняку сосни з затемненням 45% похибки зростають до 2,1 см з коефіцієнтом деградації 1,75 при кількості супутників 20 одиниць. У мішаному деревостані з затемненням 65% похибки досягають 3,4 см з коефіцієнтом деградації 2,83 та епізодичними втратами фіксованого рішення тривалістю 1-2 хвилини на 30% контрольних пунктів. У стиглому ялиновому лісі з затемненням 75% похибки зростають до 8,9 см для горизонтального положення та 9,1 см для висоти з коефіцієнтом деградації 7,42-7,58. Такі великі похибки виходять за межі допустимих значень для високоточних геодезичних робіт. На 60% контрольних пунктів спостерігалися втрати супутникового сигналу з максимальною тривалістю відновлення до 5 хвилин, що призводить до зростання часу зйомки в 61 раз на окремих пунктах.

Кореляційний аналіз виявив сильну позитивну залежність між затемненням та похибками з експоненційним характером та критичною точкою

перегину в діапазоні 65-70% затемнення. До цього порогу приріст похибки становить 0,5-0,7 см на кожні 10% збільшення затемнення, після переходу порогу швидкість деградації зростає до 2,5-3,0 см на кожні 5% збільшення затемнення. Встановлено сильну негативну кореляцію між затемненням та кількістю супутників з втратою до 36% у найщільніших деревостанах зі швидкістю приблизно 0,4 супутника на кожні 10% збільшення затемнення.

Порівняльний аналіз продуктивності праці продемонстрував значну перевагу RTK методу зі скороченням витрат робочого часу в 14-16 разів в умовах відкритої місцевості, в 8-9 разів у середньовікових деревостанах та в 5-7 разів у стиглих насадженнях. Для визначення координат 30 межових знаків традиційний метод вимагає 22-30 людино-годин для бригади з двох виконавців, тоді як RTK метод скорочує витрати до 1,5-4,5 людино-годин для одного оператора. Економічна ефективність забезпечує окупність обладнання вартістю 2500 доларів протягом 1-2 років при виконанні 10 об'єктів на рік з економією 200-300 доларів на один об'єкт за рахунок зменшення витрат на оплату праці та відсутності необхідності прокладання теодолітних ходів і розчищення візирних коридорів.

На основі результатів досліджень розроблено практичні рекомендації, які встановлюють три категорії придатності RTK: повна придатність для всіх робіт при затемненні до 45% з похибками не більше 2,1 см, прийнятність для більшості застосувань при затемненні 45-65% з похибками до 3,4 см, та обмежене використання при затемненні понад 65% з необхідністю індивідуальної оцінки через зростання похибок до 8,9-9,1 см. Для забезпечення надійності рекомендується проведення тестових вимірювань до початку масштабних робіт, врахування фенологічного стану рослинності з перевагою безлистяного періоду для листяних порід, вибір місць встановлення приймача на локальних просвітах та контроль якості на основі моніторингу параметрів координатного рішення в реальному часі з прийняттям результатів лише при

фіксованому рішенні з кількістю супутників не менше 8 одиниць та PDOP не більше 4,0 одиниці.

Наукова новизна роботи полягає у кількісному встановленні експоненційної залежності точності RTK GNSS від ступеня затемнення для умов Передкарпаття з використанням сучасних мультисистемних приймачів. Вперше для західного регіону України визначено критичний поріг затемнення крон у діапазоні 65-70%, після якого відбувається різке погіршення умов для супутникових спостережень. Встановлено кількісні коефіцієнти деградації точності від 1,54-2,00 для молодняків до 6,62-7,58 для стиглих деревостанів. Розроблена методика експериментальних досліджень може бути адаптована для інших регіонів України з метою формування національної бази даних про точність GNSS вимірювань.

Практична цінність роботи визначається розробкою конкретних рекомендацій щодо застосування RTK GNSS з урахуванням специфіки різних типів деревостанів та встановленням кількісних критеріїв придатності технології. Результати можуть бути використані лісогосподарськими підприємствами для обґрунтованого прийняття рішень щодо впровадження RTK технології, а розроблені рекомендації можуть стати основою для формування галузевих методичних вказівок з використання RTK GNSS у лісовому господарстві України.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням експериментальної бази на інші природно-кліматичні зони України, дослідженням сезонної варіабельності точності в листяних лісах, вивченням можливостей підвищення точності шляхом використання спеціалізованих антен та удосконалених алгоритмів обробки, а також інтеграції RTK GNSS з іншими технологіями дистанційного зондування для комплексного геодезичного та таксаційного забезпечення лісовпорядних робіт.

Результати магістерської роботи мають важливе значення для модернізації методів геодезичного забезпечення лісового господарства України та створення передумов для масштабного впровадження RTK GNSS технології у практику лісовпорядкування. Впровадження RTK у поєднанні з геоінформаційними системами створює основу для цифрової трансформації лісового господарства України з переходом до сучасних методів управління лісовими ресурсами на основі актуальної просторової інформації високої точності.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. – Vienna: Springer, 2008. – 516 p.
2. Takac F. SmartRTK: A Novel Method of Processing Standardised RTCM Network RTK Information for High Precision Positioning / F. Takac, O. Zelzer // Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008). – Savannah, GA, 2008. – P. 16-19.
3. Pirti A. Performance Analysis of the Real Time Kinematic GPS (RTK GPS) Technique in a Highway Project (Stake-out) / A. Pirti, M. Hosbas // Survey Review. – 2008. – Vol. 40. – No. 307. – P. 47-54.
4. Sigrist P. Assessment of GPS Positioning in Forest Environments: Preliminary Results / P. Sigrist, P. Coppin, M. Hermy // Proceedings of 3rd International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. – Quebec, 1998. – P. 135-142.
5. Wing M.G. Consumer-Grade Global Positioning System (GPS) Accuracy and Reliability / M.G. Wing, A. Eklund, L.D. Kellogg // Journal of Forestry. – 2005. – Vol. 103. – No. 4. – P. 169-173.

6. Навіцкас Ю. Застосування супутникових технологій у лісовпорядкуванні / Ю. Навіцкас, В. Петраускас // Лісове господарство. – 2019. – № 3. – С. 45-52.
7. Державна служба геодезії, картографії та кадастру України. Мережа активних референтних станцій ZAKPOS. Посилання: <https://zakpos.gki.com.ua/>
8. ДБН В.1.3-2:2010. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 70 с.
9. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). – Київ: Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1998. – 155 с.
10. Hi-Target Surveying Instrument Co., Ltd. V100 GNSS RTK System User Manual. – Guangzhou, China, 2020. – 128 p.
11. Kaplan E.D. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition / E.D. Kaplan, C.J. Hegarty. – Boston: Artech House, 2017. – 1056 p.
12. Лесів М.М. Методика проведення геодезичних робіт у лісовій місцевості / М.М. Лесів, І.В. Криницький // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2018. – Вип. 1(35). – С. 78-84.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи: «потенціал rtk gnss технологій для знімань в лісовій місцевості на прикладі лісів західного регіону України»

Обсяг пояснювальної записки: 82 аркушів.

23.12.25 рік

(дата)

(підпис студента)