

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*Факультет лісового господарства та екології
Кафедра лісового та садово-паркового господарства*

Кваліфікаційна робота на правах рукопису

Вороний Андрій Олексійович

УДК 630*524.3:528.8

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ДЛЯ
ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ СОСНОВИХ ДЕРЕВОСТАНІВ**

205 «Лісове господарство»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Вороний А.О.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Дячук П.П.
(прізвище, ім'я, по батькові)
Доктор філософії (PhD)
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

Висновок кафедри лісового та садово-паркового господарства

за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри _____

№ ____ від «__» ____ 2025 р.

Завідувач кафедри лісового та садово-паркового господарства

К.с.-г.н., доцент _____ Юрій СІРУК

«__» ____ 2025 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти _____ захистив (ла)
(прізвище ,ім'я, по батькові)

кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар _____
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище ,ім'я, по батькові)

АНОТАЦІЯ

Вороний А. О. Використання мобільного лазерного сканування для інвентаризації соснових деревостанів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Робота присвячена дослідженню можливостей застосування мобільного наземного лазерного сканування на основі технології SLAM для інвентаризації соснових деревостанів у умовах Українського Полісся. У роботі проаналізовано теоретичні основи традиційної лісової таксації та сучасний стан розвитку дистанційних і лазерних технологій збору лісівничої інформації. Об'єктом дослідження є стиглий сосновий деревостан Малоцвілянського лісництва Звягельського надлісництва ДП «Ліси України». Предметом дослідження є таксаційні показники деревостанів, визначені за даними мобільного та повітряного лазерного сканування. Польові дослідження виконано з використанням мобільного лазерного сканера AlphaGeo SLAM R100 та безпілотного літального апарата DJI Matrice 300 RTK з фотолідарною камерою DJI Zenmuse L1. У процесі досліджень сформовано хмари точок, цифрові моделі рельєфу та висоти полого, виконано подеревну ідентифікацію та розрахунок основних таксаційних показників. Проведено порівняльний аналіз результатів лазерного сканування з матеріалами перелікової таксації відводу в рубку головного користування. Встановлено, що мобільне лазерне сканування забезпечує високу деталізацію піднаметового простору та надійне визначення висот і просторового розміщення дерев, однак точність визначення діаметрів стовбурів є чутливою до якості сегментації хмар точок.

Ключові слова: SLAM, LiDAR, інвентаризація лісів, соснові деревостани, таксація лісу, хмара точок.

ANNOTATION

Voronyi A. O. Application of Mobile Laser Scanning for the Inventory of Pine Stands. – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for the master's degree in specialty 205 – forestry. Polissya National University, Zhytomyr, 2025.

The thesis is devoted to the assessment of the applicability of mobile terrestrial laser scanning based on SLAM technology for the forest inventory of pine stands under the conditions of the Ukrainian Polissia. The study analyzes the theoretical foundations of traditional forest mensuration and reviews the current state of development of remote sensing and laser-based technologies for the acquisition of forestry data. The object of the research is a mature pine stand within the Malotsvilianske Forestry of the Zviahel Forest Enterprise of the State Enterprise “Forests of Ukraine”. The subject of the research comprises stand-level forest inventory parameters derived from mobile and airborne laser scanning data. Field surveys were conducted using the AlphaGeo SLAM R100 mobile laser scanner and an unmanned aerial vehicle DJI Matrice 300 RTK equipped with a DJI Zenmuse L1 LiDAR sensor. During the study, three-dimensional point clouds, digital terrain models, and canopy height models were generated, followed by individual tree detection and the calculation of key forest mensuration parameters. A comparative analysis of laser scanning results and conventional tree-by-tree inventory data collected for final felling allocation was performed. The results demonstrate that mobile laser scanning provides a high level of detail of the understory space and ensures reliable estimation of tree heights and spatial distribution. At the same time, the accuracy of stem diameter estimation is sensitive to the quality of point cloud segmentation and requires additional validation.

Keywords: SLAM, LiDAR, forest inventory, pine stands, forest mensuration, point cloud.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1.	
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ЛІСІВ	10
1.1. Традиційні методи таксації лісових насаджень.	10
1.1.1. Історичні особливості формування лісової таксації.	10
1.1.2. Основні таксаційні показники та способи їх визначення.	11
1.1.3. Обмеження традиційних методів лісової таксації.....	13
1.2. Дистанційні методи збору даних у лісовому господарстві	16
1.2.1. Аерофотознімання та супутникові дані.	16
1.2.2. Лазерне сканування (LiDAR): принцип дії, типи, переваги.	17
1.3. Мобільного лазерне сканування та технологія SLAM.....	19
1.3.1. Принципи роботи SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).	19
1.3.2. Типи мобільних сканерів (ручні, рюкзачні, автомобільні, дроніві.....	21
1.3.3. Особливості застосування мобільного лазерного сканування у лісовому середовищі.	22
РОЗДІЛ 2.	
МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	26
2.1. Розташування та характеристика об'єкта дослідження.	26
2.2. Використане обладнання та програмне забезпечення.	28
2.3. Методика польових робіт.....	29
2.4. Методика обробки даних.	30
РОЗДІЛ 3.	
РЕЗУЛЬТАТИ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗУ	33
3.1. Характеристика отриманих хмар точок та 3D-моделей.....	33
3.2. Розраховані таксаційні показники з даних мобільного лазерного сканування.	39
3.3. Порівняння результатів лазерного сканування та даних перелікової таксації відводу.	41
ВИСНОВКИ.....	47

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЛМГ – лісомисливське господарство;

ДП – державне підприємство;

ТЛУ – тип лісорослинних умов;

кв – квартал;

в. – виділ;

ЦМР – цифрова модель рельєфу;

СНМ – цифрова модель висоти пологоу;

LiDAR – Light Detection and Ranging;

MLS – Mobile Laser Scanning – Мобільне лазерне сканування;

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping – Одночасна локалізація та побудова карти

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Сучасні вимоги ведення лісового господарства потребують високоточної, оперативної та економічно ефективної інвентаризації лісових ресурсів. Традиційні методи таксації лісу є трудомісткими та залежать від погодних умов. Мобільне лазерне сканування (Mobile Laser Scanning, MLS), зокрема з використанням технології SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), дозволяє отримувати високоточні 3D-моделі лісових насаджень без необхідності GNSS на кожній точці. Це відкриває нові можливості для оперативної інвентаризації, моніторингу та цифровізації лісового господарства України.

Мета та завдання роботи. Основною метою є оцінка можливостей та точності застосування мобільного лазерного сканування для інвентаризації соснових деревостанів у порівнянні з традиційними методами таксації

Для успішного досягнення мети заплановано виконання наступних завдань:

- Проаналізувати сучасні технології мобільного лазерного сканування та їх застосування в лісовому господарстві;
- Ознайомитись з технологією SLAM та принципами побудови 3D-моделей лісових насаджень;
- Провести таксацію деревостану згідно перелікової таксації відведення ділянки у рубку головного коритсування;
- Провести польове сканування ділянки за допомогою мобільного сканера;
- Обробити отримані дані у спеціалізованому програмному забезпеченні;
- Визначити основні таксаційні показники та порівняти їх з матеріалами відводу;

- Оцінити точність та ефективність мобільного лазерного сканування для інвентаризації соснових деревостанів.

Об’єкт досліджень: Соснові деревостани на території Звягельського надлісництва.

Предмет досліджень: Таксаційна характеристика соснових деревостанів.

Методи досліджень: Таксації лісу, наземного мобільного лазерного сканування, обробка хмар точок, порівняльний аналіз даних мобільного лазерного сканування та даних «класичної» таксації лісу, статистичні методи оцінки точності.

Перелік публікацій автора за темою дослідження. По матеріалах виконаних досліджень було одноосібно опубліковано три наукові праці та одну доповідь на форумі:

Вороний А. О., Лазерне сканування у сосновому деревостані. Студентські наукові читання – 2025: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. присвячені I-му туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт (10 грудня 2025 р.). Житомир: Поліський національний університет. С 11

Вороний А. О., Можливості застосування SLAM технологій у лісовому господарстві. Форум «Green & Digital Polissia: Ecology & Forestry». 17 червня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет. С. 54-56

Вороний А. О., Перспективи використання технологій LIDAR та SLAM сканування у лісових насадженнях. Міжнародна науково-практична конференція «Лісівнича освіта та наука в умовах національних викликів та європейської інтеграції України». (5 – 6 червня 2025 року). Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 54-55

Вороний А. О., Сучасні підходи до наземної інвентаризації лісів із використанням SLAM-технологій. Студентські наукові читання – 2025: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. присвячені I-му туру Всеукраїнського

конкурсу студентських наукових робіт (10 грудня 2025 р.). Житомир: Поліський національний університет. С. 56 - 57

Практична значущість результатів дослідження.

Результати дослідження можуть бути використані лісокористувачами та науковими установами для впровадження сучасних цифрових технологій інвентаризації соснових деревостанів, оптимізації витрат часу та підвищення точності даних таксації.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи.

Загальний обсяг кваліфікаційної роботи становить 54 сторінок, з яких 39 сторінок це основна частина. У роботі також міститься 1 таблиця, 12 рисунків. Аналіз інформаційних даних забезпечило опрацювання з 44 джерел.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ЛІСІВ

1.1. Традиційні методи таксації лісових насаджень.

Теоретичні основи інвентаризації лісів формувалися у тісному зв'язку з розвитком лісівництва як науки та практики, починаючи з моменту усвідомлення необхідності кількісної оцінки лісових ресурсів для забезпечення сталого та невиснажливого користування. Класична лісова таксація розглядає деревостан як об'єкт вимірювання, для якого визначаються кількісні та якісні показники, що характеризують його структуру, продуктивність і господарську цінність.

1.1.1. Історичні особливості формування лісової таксації.

Лісова таксація як наукова дисципліна сформувалася в результаті розвитку потреб у кількісній та якісній оцінці лісових ресурсів для забезпечення сталого лісокористування. Історично її витоки пов'язані з лісівничою практикою країн Центральної Європи XVII–XVIII століть, де вперше було усвідомлено необхідність регламентованого користування лісами на основі точних вимірювань запасу деревини та її приросту. Класичні положення лісової таксації були систематизовані в працях німецької лісівничої школи, що заклала підґрунтя для подальшого розвитку методів оцінки продуктивності та структури деревостанів [1].

В Україні становлення лісової таксації як наукової галузі відбувалося під значним впливом європейської лісівничої школи, але водночас набуло власних рис, зумовлених різноманітністю природно-кліматичних умов і типів лісів. Вагомий внесок у формування національної школи лісової таксації зробив Г. М. Висоцький, який одним із перших обґрунтував необхідність поєднання таксаційних показників із типологією лісорослинних умов та ґрунтово-кліматичними факторами. Його праці стали методологічною основою для подальшого розвитку лісовпорядкування на території України.

Упродовж XX століття вітчизняна лісова таксація розвивалася в межах централізованої системи лісовпорядкування, що передбачала суцільні польові обстеження лісових масивів із використанням наземних інструментальних методів. Класичний комплекс таксаційних робіт включає визначення діаметра дерев на висоті 1,3 м, вимірювання висоти, визначення відносної та абсолютної повноти, запасу та вікової структури деревостанів. Поряд із суцільними обстеженнями, у другій половині XX століття в Україні почали впроваджуватися елементи вибіркової інвентаризації, що відповідало світовим тенденціям розвитку національних лісових інвентаризацій.

Таким чином, традиційні методи лісової таксації, сформовані впродовж кількох століть, залишаються фундаментом сучасної системи національної інвентаризації лісу та лісовпорядкування. Вони забезпечують методичну спадкоємність, порівнянність даних у часі та слугують основою для калібрування й перевірки результатів, отриманих за допомогою технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

1.1.2. Основні таксаційні показники та способи їх визначення.

Традиційна лісова таксація спирається на набір базових таксаційних показників, які описують деревостан як сукупність дерев на певній площі та дозволяють порівнювати насадження між собою, планувати рубки, відтворення та охорону лісів. У практиці лісовпорядкування України ці показники є основою для складання проєкту організації і розвитку лісового господарства та формування таксаційних описів, що прямо закріплено у нормативному полі [2, 3].

Найпоширенішими «першими» вимірюваннями на рівні окремого дерева є діаметр на висоті 1,3 м та висота дерева. Висота 1,3 м прийнята як стандарт, бо зручна для повторюваних вимірювань і забезпечує зіставність результатів між різними виконавцями та інвентаризаціями. На практиці діаметр визначають мірною вилкою або стрічкою, дотримуючись правил прикладання інструмента та

уникаючи впливу напливів, пошкоджень чи деформацій стовбура в зоні вимірювання [4].

Висоту дерев у традиційній таксації встановлюють інструментально висотомірами різних типів або за допомогою вибіркового вимірювання із подальшим використанням залежностей «висота–діаметр» для конкретного насадження. Для лісівничих розрахунків важливо не лише «максимальна» висота окремих дерев, а й середні характеристики деревостану, оскільки саме вони використовуються у нормативних матеріалах і моделях запасу.

Ще один базовий інтегральний показник – сума площ поперечних перерізів на 1 га (G , $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$), яку часто вважають найкращим мостом між індивідуальними вимірюваннями дерев і характеристиками деревостану. Абсолютну повноту в навчально-методичних матеріалах визначають як – G , тобто сума поперечних перерізів стовбурів на висоті 1,3 м у перерахунку на гектар [3].

Відносна повнота застосовується тоді, коли потрібно порівняти насадження різного віку чи бонітету: її зазвичай трактують як відношення фактичної повноти (G) до повноти нормального деревостану у певному віці для певних умов. У практиці це зручно для призначення рубок догляду, аналізу стану насадження та контролю зрідження чи перезагущення. У міжнародній літературі аналогічні ідеї реалізують через показники “*stand density*” та індекси щільності, що також оперують площами перерізів або кількістю стовбурів на одиницю площі [5].

Запас деревостану (V , $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$) – центральний показник для господарських рішень, економічної оцінки та планування лісокористування. У традиційній методиці запас отримують через об’ємні (або сортиментні) таблиці та нормативи, де основними входами виступають діаметр і висота, інколи з урахуванням розрядів висот. Саме тому точність вимірювання діаметру на 1,3 м та висоти дерев прямо впливає на точність запасу, а під час робіт важливі як

інструментальна дисципліна, так і правильний вибір нормативів для породи [3, 6].

Продуктивність деревостанів в Україні традиційно визначають за класами бонітету, віку та типу лісорослинних умов. Бонітет може відображати потенційну продуктивність місцезростання або розвиток деревостану через висоту у певному віці, а у лісовпорядній документації він використовується для прогнозування приростів та узгодження господарських заходів із природними можливостями ділянки [3, 7, 8].

Окремо слід розрізняти «таксаційні» та «візуально-описові» характеристики насаджень: породний склад, тип лісу, вік, клас якості, стан і товарність формуються на підставі поєднання вимірювань і фахової оцінки в полі на основі нормативів. У практиці ці показники визначають інтерпретацію вимірюваних показників і входять до матеріалів лісовпорядкування та проєктів організації та ведення господарства [9].

Таким чином, традиційна таксація лісових насаджень у сучасних умовах залишається системою взаємопов'язаних вимірювань і розрахунків: від діаметра й висоти окремого дерева — до інтегральних показників деревостану (G , повнота, запас), а далі — до інтерпретації продуктивності через вік, бонітет і лісорослинні умови.

1.1.3. Обмеження традиційних методів лісової таксації.

Традиційні методи таксації: перелікові вимірювання, пробні площі, інструментальні заміри діаметра та висоти, візуальна оцінка повноти й санітарного стану історично забезпечували лісове господарство України даними для планування рубок, відтворення та охорони лісів, однак у сучасних умовах дедалі виразніше проявляються їхні методичні та організаційні обмеження, що впливають на оперативність і порівнюваність результатів між різними виконавцями та періодами обліку.

Першим системним обмеженням є висока трудомісткість і вартість збору даних у полі. Наземні вимірювання потребують значної кількості часу на

переміщення, розбиття та закріплення пробних площ, виконання серій вимірювань і подальшу камеральну обробку, а для масштабних інвентаризацій це перетворюється на критичний ресурсний фактор, який обмежує частоту оновлення інформації й деталізацію охоплення території. Саме «ціна й час» польових робіт традиційно називаються одними з головних бар'єрів для повноцінних національних інвентаризацій у міжнародних методичних узагальненнях, що добре пояснює актуальність проблеми і для України [4, 10, 11].

Другою групою обмежень є похибки вимірювань та їх накопичення в похідних показниках (сума площ перерізів, запас, повнота, товарна структура). Навіть відносно невеликі помилки у визначенні діаметра або висоти можуть призводити до відчутних відхилень у розрахованому запасі, особливо якщо застосовуються табличні нормативи й округлення, а також коли деревостан є неоднорідним за будовою. У вчальні та методичні матеріали з лісової таксації прямо вказують, що табличні підходи і округлення можуть давати істотні випадкові похибки при масових вимірах, що є важливим для інтерпретації результатів традиційної таксації [3, 12].

Третє обмеження пов'язане з суб'єктивністю частини таксаційних ознак, які визначаються експертно (зімкнутість/повнота у польовій оцінці, санітарний стан, структура підросту, частково межі виділів у складних за складом та будовою насадженнях). Навіть за наявності інструктивно-методичних вимог і стандартів виконання робіт різні виконавці можуть по-різному інтерпретувати візуальні критерії, що знижує відтворюваність даних і ускладнює порівняння між лісокористувачами або між різними циклами лісовпорядкувань. Цей ризик особливо проявляється тоді, коли результати повинні бути зіставними на рівні регіону або країни й використовуватися у звітності та плануванні [2, 9].

Четверте обмеження – обмежена оперативність оновлення інформації про стан лісів. Традиційні таксаційні матеріали формуються циклічно за організаційними графіками лісовпорядкування чи спеціальних обстежень, і між

циклами можуть відбуватися суттєві зміни викликані вітровалами, пожежами, шкідниками, незаконні рубки, військові впливи, які не завжди вчасно потрапляють у бази даних у стандартизованому вигляді.

П'яте суттєве обмеження — фізична (або юридична) недоступність частини територій для польових робіт. Для України це набуло особливої ваги в умовах обмеженого доступу до окремих ділянок, де виконання польових вимірювань може бути неможливим або небезпечним. Показово, що в нормативних змінах щодо проведення національної інвентаризації прямо передбачено використання даних дистанційного зондування Землі (аеро- або космічної зйомки) на інвентаризаційних ділянках з обмеженим доступом, що фактично фіксує межу застосовності суто традиційних польових методів [13].

Шосте обмеження полягає в тому, що класичні інструментальні вимірювання не завжди ефективні для опису просторової структури деревостану (горизонтальна й вертикальна неоднорідність, взаємне перекриття крон, багаторушність), тоді як сучасні задачі управління лісами дедалі частіше потребують саме структурних метрик (наприклад, для оцінки біорізноманіття, стійкості, вуглецевих запасів та екосистемних послуг). За таких умов традиційна таксація лишається надійним «еталоном» для базових показників, але може бути недостатньо деталізованою для частини нових управлінських і дослідницьких потреб без суттєвого зростання трудовитрат.

Сьоме – камеральний етап і управління даними: традиційний підхід часто передбачає розділення між польовим збором і подальшими розрахунками/перевірками, що створює ризики затримок, втрати частини первинних даних або складнощів з контролем якості на рівні окремих вимірювань. У проєктах технічної підтримки національної інвентаризації лісів наголошується, що забезпечення якості є критичною частиною процесу, а методичні процедури, програмні засоби й організація контролю безпосередньо впливають на кінцеву надійність результатів [14].

Отже, традиційні методи таксації в Україні зберігають фундаментальну роль завдяки високій точності базових польових вимірювань і нормативній вбудованості в лісогосподарські процеси, однак їхні обмеження – висока вартість і тривалість робіт, ризики суб'єктивності, похибки в похідних показниках, недостатня оперативність і проблеми доступу – формують потребу в поєднанні класичної таксації з сучасними технологіями інвентаризації (ДЗЗ, аеролідар, наземне/мобільне 3D-сканування) у межах єдиної системи даних.

1.2. Дистанційні методи збору даних у лісовому господарстві

1.2.1. Аерофотознімання та супутникові дані.

Аерофото- та супутникові дані в лісовому господарстві розглядають як ключове доповнення до наземної таксації, бо вони дають просторово суцільну інформацію про стан насаджень, структуру лісового покриву та його зміни у часі. Ця логіка закріплюється й на рівні державних підходів до інвентаризації та моніторингу лісів: поряд із польовими вимірюваннями дедалі частіше використовують дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) як джерело карти-основи, допоміжних шарів та індикаторів змін [15–17].

У практиці лісовпорядкування та інвентаризації в Україні аерофотознімання цінується за високу деталізацію, можливість отримати актуальні ортофотоплани та цифрові моделі поверхні/рельєфу на обмежених територіях, а також за керованість процесу зйомки, вибір сезону, висоти, перекриттів, параметрів камери. Важливим продуктом аерофотознімання є ортофотоплан – геометрично виправлене зображення з прив'язкою до координат, яке використовується як картографічна основа й для територіального планування, і для природоресурсних задач.

Окремий клас джерел даних – супутникові знімки, які виграють за рахунок регулярності повторних зйомок і доступності часових рядів. У контексті лісів найчастіше використовують оптичні мультиспектральні дані для

оцінювання стану рослинності через індекси та спектральні ознаки, картографування типів покриття та виявлення змін (суцільні рубки, вітровали, пожежі, деградація) [16, 18]. Серед найбільш уживаних безкоштовних супутникових даних для задач лісового моніторингу – **Sentinel-2** (програма Copernicus): він дає 13 спектральних каналів із просторовою роздільною здатністю 10–60 м і типовою повторюваністю близько 5 днів, що дозволяє відстежувати зміни протягом сезону та працювати з дрібнішою мозаїчністю ландшафтів [19].

Для довгих часових рядів і ретроспективного аналізу змін лісового покриття часто застосовують Landsat (USGS/NASA): класично супутник проходить над тією ж ділянкою з періодом 16 діб, а при наявності двох апаратів (Landsat 8 і 9) ефективна повторюваність може скорочуватися до ~8 днів для частини територій. Просторова роздільна здатність основних каналів (типово 30 м) гірша, ніж у Sentinel-2, однак перевагою є довготривала узгоджена серія спостережень, придатна для аналізу динаміки лісів на десятилітніх інтервалах [16].

Науково-освітня література з ДЗЗ у лісовому господарстві підкреслює, що якість застосування аерофото- й супутникових даних визначається не лише роздільною здатністю, а й коректністю передобробки (геоприв'язка, атмосферна корекція, маскування хмар/тіней), вибором сезонів, а також поєднанням із наземними даними для калібрування та валідації результатів [17].

1.2.2. Лазерне сканування (LiDAR): принцип дії, типи, переваги.

Лазерне сканування (LiDAR, Light Detection and Ranging) у лісовому господарстві розглядають як «активний» метод дистанційного зондування, який сам випромінює сигнал і вимірює відстань до об'єктів за часом проходження лазерного імпульсу (time-of-flight), формуючи тривимірну хмару точок із координатами X-Y-Z та додатковими атрибутами [20].

Принципово важливо, що у лісі один імпульс може давати кілька «повернень» (від крони, піднаметової рослинності й ґрунту), тому LiDAR дозволяє описувати вертикальну структуру насадження, а не лише «верхню» поверхню, як це часто буває з оптичними знімками. Саме здатність частково проникати крізь полог і отримувати наземні відбиття зробила LiDAR одним із базових джерел для побудови цифрових моделей рельєфу (ЦМР) у лісових умовах [21].

У лісовій інвентаризації найчастіше виділяють два підходи використання LiDAR: площинний, коли метрики хмари точок узагальнюють у межах сітки/таксаційного виділу та через регресійні моделі оцінюють запас, біомасу, і подеревний, коли алгоритми намагаються виділити окремі дерева та оцінити їхні параметри. Вибір методу залежить від щільності точок, типу сенсора, структури деревостану та доступності даних таксаційної характеристики деревостану для калібрування моделей [22]. За платформою та масштабом зйомки розрізняють повітряне лазерне сканування (літак/гелікоптер), безпілотне (дрон), (3) наземне стаціонарне (сканування зі штатива) і (4) мобільне наземне сканування, зокрема SLAM-системи, де траєкторію руху оцінюють одночасною локалізацією та побудовою карти [20, 23]. Окремо в сучасному ДЗЗ виділяють супутниковий LiDAR глобальні місії для оцінки структури лісів, який корисний для великомасштабних оцінок і валідації, але зазвичай не дає тієї деталізації, що потрібна для лісовпорядкування на рівні квартал-виділ або для подеревних задач, але залишається актуальним для територій забруднених вибухонебезпечними предметами.

Переваги лазерного сканування для інвентаризації лісів найчастіше пов'язують із можливістю отримувати точні показники висоти дерев у деревостані, зменшення залежності від освітлення, відносно об'єктивним і відтворюваним вимірюванням таксаційних показників та потенціалом автоматизації розрахунків через математичні моделі, які поєднують

закономірності росту та розвитку деревостанів та окремих дерев з даними класичної таксації лісу.

Щодо програмного забезпечення, у практиці багато реалізують відкритих інструментах, наприклад, у середовищі R, де пакети на кшталт [**lidR**] забезпечують повний цикл обробки лідарних даних для задач лісової таксації [24]. Лазерне сканування у лісовому господарстві доцільно трактувати не як заміник класичної таксації, а як інструмент, що розширює інвентаризаційні можливості він добре масштабується на великі території, дає доступ до детальної геометрії дерев і доповнює можливості моніторингу змін у лісових екосистемах.

1.3. Мобільного лазерне сканування та технологія SLAM.

1.3.1. Принципи роботи SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Мобільне лазерне сканування (Mobile Laser Scanning, MLS) у поєднанні з технологією SLAM розглядають як «польовий» варіант 3D-зйомки, коли оператор із ручним/ранцевим сканером проходить пробну площу або ділянку, а система в режимі реального часу накопичує хмару точок і одночасно відображає траєкторію та кількісний розподіл хмари точок сканованого середовища. На відміну від БПЛА-LiDAR, MLS-SLAM (Рис.1.1) краще сканує надземну частину деревостану тобто стовбури, підріст та підлісок, другий ярус, хоча верхівки дерев можуть частково «втрачатися» через перекриття кронами [25]. SLAM у загальному вигляді – це задача, де система має одночасно побудувати карту середовища і визначити власне положення та орієнтацію в цій карті. Класичний підхід описують через байєсівську постановку: на кожному кроці руху оновлюється позиція/орієнтація сенсора та моделі середовища з урахуванням вимірювань і невизначеностей, а ключовим вважають обчислювальну складність, коректне зіставлення спостережень та спосіб подання карти [26].



Рис. 1.1. Ручний лазерний сканер FJD TRION™ S1 3D LIDAR SCANNER [27]

Як правило, SLAM-система складається з двох частин: передній контур (*front-end*), який із сирих даних виділяє ознаки та оцінює відносний рух між сусідніми сканами (одометрія), і задній контур (*back-end*), який оптимізує траєкторію та карту, накопичуючи обмеження (*constraints*) і зменшуючи дрейф. Для LiDAR-SLAM передній контур часто спирається на реєстрацію сканів (*scan matching*) або на виділення характерних елементів (лінії/краї/площини) з наступною оптимізацією, а задній контур зазвичай реалізують як граф оптимізації, де вузли – це пози (*poses*), а ребра – «зв'язки» від одометрії та повторних спостережень. Саме задній контур відповідає за підтягування траєкторії, коли система розуміє, що повернулася в уже відвідане місце [26, 28].

Окремий принципово важливий механізм – замикання циклу (*loop closure*) коли сканер проходить по контуру і повертається близько до старту або до вже пройденого сегмента, алгоритм намагається розпізнати цю подібність і додати нове обмеження між двома моментами траєкторії. Після цього виконується глобальна оптимізація, мінімізація похибок, яка різко зменшує накопичений дрейф координат. Цю особливість зазвичай підкреслюють як одну з ключових

причин, чому прохід з поверненням (петля) дає кращу геометрію хмари точок, ніж лінійний маршрут без контрольних перетинів [29].

Використання SLAM у лісовому господарстві має свою специфіку. З одного боку, у деревостані багато повторюваних об'єктів, ряди стовбурів, крони, що ускладнює зіставлення ознак. З іншого – стовбури дерев є досить стабільними геометричними орієнтирами, якщо вони в зоні сканування. Тому для застосування в лісових масивах вказують, що точність мобільного лазерного сканування сильно залежить від: щільності точок на стовбурах, швидкості руху оператора, густоти проходів та наявності петель, а також від допоміжних датчиків та їх калібрування [30].

1.3.2. Типи мобільних сканерів (ручні, рюкзачні, автомобільні, дрони).

Найпоширеніший клас – ручні SLAM-сканери. Вони орієнтовані на роботу однією людиною, придатні для маршрутів між деревами, швидких зніманих пробних площ і складних ділянок, де техніка не проходить. В описах виробників і технічних листах зазвичай акцентують на дальності, продуктивності (кількість точок/с), масі та типових сценаріях (відкриті, підземні/закриті простори), що прямо визначає придатність до таксаційних задач на рівні дерева [27, 31].

Другий за поширенням клас – рюкзачні системи (рис. 1.2а), які переносяться оператором за принципом заплічного рюкзака, але мають більшу стабільність платформи, ширший набір сенсорів, камери, GNSS приймачі у деяких рішеннях і розраховані на більші обсяги робіт та довші маршрути. У таких системах важливими є ергономіка, автономність і сенсорна фузія, що підвищує стійкість траєкторії та якість геометрії на протяжних ходах, а в результаті – якість хмари точок деревостану.

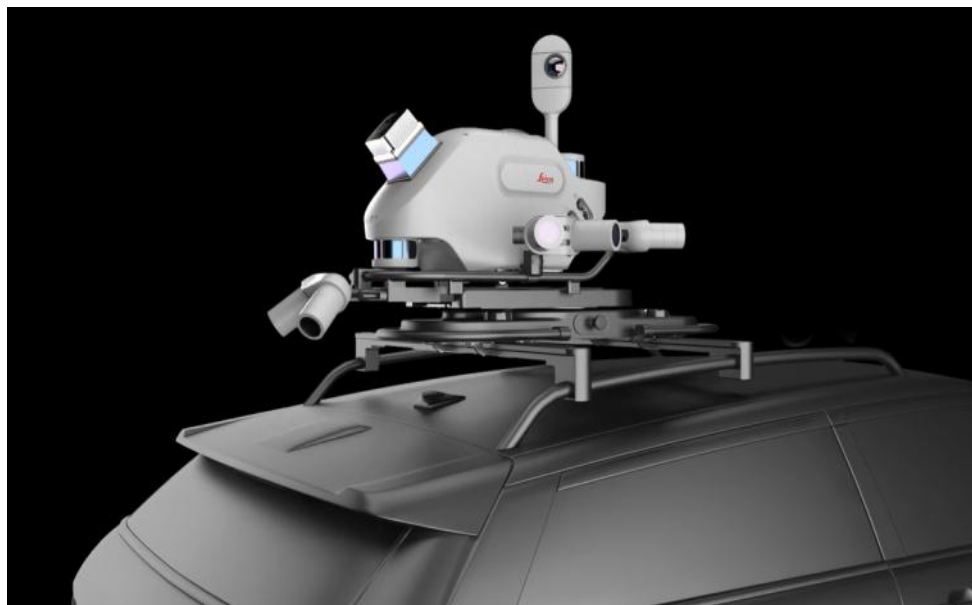
Третій клас – транспортні мобільні сканери (рис. 1.2б). Їх застосовують за потреби швидкого знімання лінійних об'єктів, дороги або інфраструктуру, а в лісовому господарстві викликає інтерес для інвентаризації придорожніх

насаджень, контролю стану лісових доріг і створення високодетальних коридорних м од

а)

б)

Рис. 1.2. а) Лідар-рюбзак *Pegasus-Backpack* від компанії *Leica* з GNNS приймачем; б) Приклад кріплення автомобільного лідарного сканеру.



Такі комплекси зазвичай мають вищу продуктивність і стабільніші траєкторії завдяки жорсткій платформі та кращій інтеграції систем глобального позиціонування, але вони обмежені доступністю проїзду й мають обмеження проникнення у густі деревостани та зараості [32, 33].

Окремо виділяють дроніві або повітряні конфігурації для літальних апаратів, коли LiDAR встановлюють на літальний засіб.

1.3.3. Особливості застосування мобільного лазерного сканування у лісовому середовищі.

Технологія SLAM-лазерного сканування із одночасною локалізацією та побудовою карти останніми роками швидко переходить із нішевого інженерного інструменту в практичну технологію польової лісової таксації. Її ключова перевага для лісового господарства України полягає у можливості оперативно

отримувати тривимірну хмару точок під наметом без розгортання стаціонарних сканерів і без трудомісткої суцільної перелікової таксації, відтворюючи при цьому структуру деревостану та просторового розміщення дерев. Огляд літератури показує, що SLAM-MLS/PLS системи здатні підтримувати інвентаризаційні задачі на рівні пробної площі та кварталу, зокрема для оцінки висот, положення дерев і частини діаметральних характеристик, хоча точність суттєво залежить від умов насаджень, траєкторії проходу та алгоритмів обробки [34].

Для українських реалій перспективним є використання SLAM як «прискорювача» наземних робіт у складних умовах доступності (перезволожені ділянки Полісся, захаращення, післяпожежні чи поствітровальні масиви), а також як джерела детальної 3D-інформації для калібрування моделей запасу й приросту, що будуються за даними дистанційного зондування Землі (аеролідар/UAV-лідар, супутникові дані). У дослідженнях демонструється практична можливість оцінювання діаметрів та інших таксаційних показників із ручних систем на основі SLAM, включно з підходами до напіваавтоматичної ідентифікації дерев і вимірювання таксаційних показників дерев та їх стовбурів у реальному часі або близько до реального часу [35]. При цьому верифікаційні експерименти з популярними системами (наприклад, GeoSLAM-класу) засвідчують, що якість ідентифікації дерев та точності оцінювання діаметра стовбура є чутливою до густоти деревостану, рельєфу та наявності підросту/чагарнику [36]. Для лісового господарства України це відкриває шлях до введення швидких протоколів «цифрової пробної площі», коли SLAM-сканування дає таксаційні показники деревостану, а класична таксація використовується як контроль та/або для показників, що важко визначити з допустимою точністю з хмари точок у конкретних умовах.

Одна із особливостей застосування SLAM у лісі є перешкоди що створюють крони для проходження сигналів приймачу GNSS і необхідність будувати траєкторії маршрутів сканування з урахуванням таксаційної

характеристики деревостану. Тому якість результату істотно залежить від маршруту оператора [37]. Додатково на якість результату впливає наявність підросту і підліску. З практики й досліджень випливає, що MLS-SLAM краще відпрацьовує стовбури на робочих висотах сканера, а результати сканування верхньої частини стовбура та особливо крон можуть бути менш стабільними [38]. Тому в оглядах і прикладних роботах часто радять комбінувати наземне сканування з повітряним для повнішого відтворення деревостану.

Отже, використання технології SLAM у лісовому господарстві потребує узгодження методик та інструкцій з чинними нормативними документами та розробкою нових. Найбільш перспективною виглядає комбінована стратегія: SLAM для піднаметової структури (діаметр, запас, густота, повнота), а аеролідар або UAV-лідар – для верхнього ярусу та визначення домінуючої висоти деревостану, що особливо актуально при веденні наближеного до природи лісівництва та відбору дерев у рубку.

Висновки до розділу 1.

1. Традиційна лісова таксація сформувалася як науково обґрунтована система вимірювань і оцінок деревостанів у відповідь потреби лісокористування та раціонального управління лісовими ресурсами. Вона історично базується на інструментальних наземних вимірюваннях окремих дерев та деревостанів, що забезпечило її методичну стабільність, спадкоємність і нормативне закріплення у практиці лісового господарства.

2. Основні таксаційні показники: діаметр на висоті 1,3 м, висота дерева, сума площ поперечних перерізів, повнота, запас, бонітет утворюють логічно пов'язану систему, у якій точність вимірювань визначає достовірність похідних таксаційних показників деревостанів. Саме ця система дозволяє здійснювати господарське планування, прогнозувати продуктивність і забезпечувати порівнюваність даних між різними деревостанами та матеріалами лісовпорядкування.

3. Традиційні методи таксації мають низку суттєвих обмежень, зокрема високу трудомісткість і вартість польових робіт, накопичення похибок у похідних показниках, суб'єктивність частини оцінок та обмежену оперативність оновлення інформації. Ці фактори знижують ефективність класичної таксації в умовах зростаючих вимог до просторової деталізації, частоти моніторингу та відтворюваності результатів.

4. Сукупність виявлених обмежень традиційних методів таксації обґрунтовує необхідність їх поєднання з дистанційними та цифровими технологіями інвентаризації, зокрема аерофотозніманням, супутниковими даними, лазерним і мобільним SLAM-скануванням.

РОЗДІЛ 2.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Розташування та характеристика об'єкта дослідження.

Дослідження виконано на території Малоцвілянського лісництва Звягельського надлісництва ДП «Ліси України» (рис. 2.1), що розташоване в межах Чижівської сільської територіальної громади Звягельського району Житомирської області. Безпосереднім об'єктом дослідження є виділ № 30 ділянки № 3 кварталу № 35, розташований на схід від села Мала Цвіля, де у березні 2024 року проведено комплексне лідарне знімання з використанням повітряних та наземних лазерних сканерів.

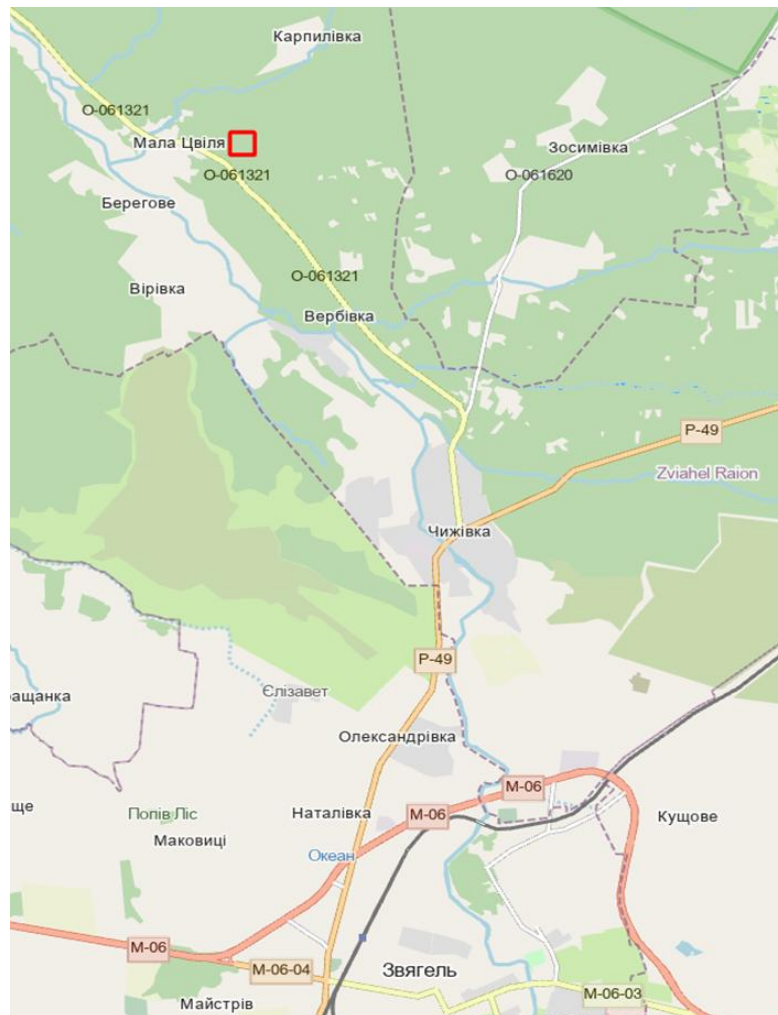


Рис. 2.1. Розташування ділянки, на якій проводилося лідарне сканування

(виділено червоним контуром)

Згідно з фізико-географічним районуванням територія дослідження належить до зони Українського Полісся, яке характеризується переважно рівнинним рельєфом, слабкою хвилястістю поверхні та значним поширенням піщаних і супіщаних відкладів. Такі умови формують специфічні лісорослинні умови, що визначають домінування соснових деревостанів і значну роль ґрунтово-гідрологічного режиму у формуванні продуктивності насаджень [39].

Клімат території дослідження є помірно континентальним із достатнім зволоженням, що є типовим для північної частини Житомирської області. Поєднання відносно м'яких зим, помірно теплих літніх періодів і достатньої кількості атмосферних опадів створює сприятливі умови для росту сосни звичайної, яка формує основний тип деревостанів у межах Малоцвілянського лісництва, що підтверджується матеріалами лісовпорядкування [40, 41].

За лісотипологічною класифікацією досліджувана ділянка представлена типовими для Полісся умовами, де переважають борові та суборові типи лісорослинних умов (рис. 2.2). Саме ці ТЛУ характеризуються легким гранулометричним складом ґрунтів, відносно низькою природною родючістю та високою чутливістю до змін водного режиму.

Площа:5.1га		Рік такс:2018 .ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ЛІСИ								
Насадження природного походження										
Гол.порода:Сосна звичайна		Бонітет:1		Пристигаючі						
Вік рубки:81		Тип ЛУ:ВЗ		Вологий дубово-сосновий субір						
Древостой	Ел.лісу	Повн.	м3/1га	т.м3(виділ)	Вік	Вис.	Діам.	м3	%діл.	Походження
Перший ярус	10Сз	0.60	370	1.89	80	26.0	30.0	1.89	90	Насінне природне
	+Бп									Вегетативне паросткове
Сухостій	+Сз		20	0.10				0.10		
Підріст	10Дз			2.00	20	3.0	тис.шт.1га		2.0	Насінне природне

Рис. 2.2. Таксаційна характеристика з ГеоПорталу «Ліси України» [41]

Досліджуваний виділ є стиглим сосновим деревостаном, у межах якого здійснювалися заходи з відведення ділянки у рубку головного користування. Це

створило унікальні умови для порівняння результатів лазерного сканування з матеріалами перелікової таксації, виконаної традиційними методами. Об'єкт дослідження є репрезентативним для умов Полісся і типовим для соснових деревостанів державних лісогосподарських підприємств України.

2.2. Використане обладнання та програмне забезпечення.

Польові дослідження виконувалися із застосуванням мобільного наземного лазерного сканера AlphaGeo SLAM R100, який належить до класу переносних SLAM-систем і призначений для оперативного 3D-сканування складних середовищ без використання стаціонарних опор або зовнішніх систем позиціонування. Використання саме цього типу обладнання було зумовлене необхідністю отримання детальної геометрії стовбурів дерев у піднаметовому просторі. Сканер AlphaGeo SLAM R100 працює за принципом одночасної локалізації та побудови карти, що дозволяє формувати тривимірну хмару точок у режимі безперервного руху оператора.

Для порівняльного аналізу та оцінки можливостей різних джерел даних у роботі також використовувалися матеріали лідарного знімання, отримані з безпілотного літального апарата DJI Matrice 300 RTK, оснащеного фотолідарною камерою DJI Zenmuse L1. Зазначене обладнання забезпечує високу щільність точок і є ефективним для створення цифрових моделей висоти пологів (CHM) та оцінки просторової структури великих лісових масивів.

Обробка та аналіз лідарних даних здійснювалися з використанням програмного забезпечення Terrasolid (пакет TerraScan), яке є одним із поширених інструментів для професійної обробки хмар точок. У межах практики Terrasolid застосовувався для ідентифікації окремих дерев, поділу суцільної хмари точок на хмари окремих стовбурів та аналізу їх геометрії. Крім того, для порівняльного аналізу та побудови цифрових моделей висоти пологів використовувалися інструменти з відкритим кодом у середовищі R, зокрема пакет lidR, що дозволяє

виконувати повний цикл обробки лідарних даних: від фільтрації наземних точок до сегментації окремих дерев і розрахунку таксаційних показників.

Для забезпечення просторової прив'язки та контролю результатів використовувалися допоміжні польові інструменти, зокрема GNSS-приймач для фіксації меж ділянки та традиційні таксаційні прилади під час перелікової таксації відводу в рубку головного користування. Поєднання GNSS-знімання меж лісосік із мобільним лазерним скануванням дозволило зіставити геометрію хмар точок з фактичними межами ділянок і результатами наземних вимірювань

2.3. Методика польових робіт.

Методика збору даних поєднувала традиційні елементи наземної таксації з сучасними методами мобільного лазерного сканування, що дозволило забезпечити порівнюваність результатів і перевірити їх практичну придатність для застосування у лісовому господарстві. Перелікова таксація на дослідній ділянці виконувалася за виробничими підходами для відведення ділянки в рубку головного користування. Вона включала переліковий облік дерев із вимірюванням ступенів товщини на висоті 1,3 м, визначення висот окремих модельних дерев, оцінку породного складу, повноти та запасу кожного елементу.

Планування маршруту мобільного лазерного сканування здійснювалося з урахуванням особливостей технології SLAM. Маршрут оператора прокладався таким чином, щоб забезпечити рівномірне покриття території виділу та максимальну кількість проходів поблизу стовбурів дерев, оскільки саме щільність точок на стовбурах визначає якість подальшої сегментації окремих дерев. Польові зйомки виконувалися у світлу пору доби за сприятливих погодних умов. Перевага надавалася періодам без опадів, сильного вітру та туману, оскільки такі фактори можуть негативно впливати як на якість лазерних вимірювань, так і на безпеку роботи оператора у лісі. Температурні умови під час

зйомки перебували в межах, рекомендованих виробником обладнання, що забезпечувало стабільну роботу сенсорів та акумуляторів.

Параметри сканування мобільного лідара задавалися відповідно до стандартних налаштувань для лісового середовища, з акцентом на досягнення достатньої щільності точок на стовбурах дерев. Швидкість руху оператора підтримувалася помірною, що дозволяло уникнути розривів у хмарі точок і забезпечувало якісну сканування території та дерев. У процесі роботи контролювався візуальний зворотний зв'язок системи, що дозволяло оперативно коригувати маршрут у разі виявлення зон із недостатнім покриттям. Отримані в польових умовах лідарні дані одразу після завершення зйомки зберігалися та архівувалися для подальшої камеральної обробки.

2.4. Методика обробки даних.

Камеральна обробка матеріалів мобільного та повітряного лазерного сканування виконувалася з метою отримання нормалізованої хмари точок, побудови похідних растрових моделей, зокрема цифрової моделі рельєфу та висоти пологоу, а також для подеревної ідентифікації з подальшим розрахунком таксаційних показників і контролем якості результатів. Основні етапи обробки відповідали наступним етапам: класифікація наземних точок, формування цифрової моделі рельєфу, нормалізація висот, побудова моделі висот пологоу та виділення окремих дерев із перевіркою результатів з даними перелікової таксації.

Початкові дані були представлені у форматі LAS/LAZ і завантажувалися для обробки у середовище R із використанням пакета **lidR**, який є спеціалізованим інструментом для аналізу даних авіаційного лазерного сканування та реалізує типові операції LiDAR-обробки хмар точок лісових масивів [24].

Першим кроком виконували виділення наземних відбиттів (*ground points*). Для цього застосовували підхід *Cloth Simulation Filtering (CSF)*, який інтерпретує задачу як накидання віртуальної тканини на інвертовану поверхню хмари точок і дозволяє відокремити рельєф від надземних об'єктів у складних умовах. У практичній реалізації в R використовували бібліотечні засоби, сумісні з CSF-підходом [42]. На основі класифікованих наземних точок формували цифрову модель рельєфу. Для інтерполяції застосовували TIN (*Triangulated Irregular Network*), який будує неперервну поверхню через триангуляцію нерегулярно розміщених опорних точок, що є стандартним підходом у LiDAR-процесингу рельєфу. Просторову роздільну здатність ЦМР задавали як 0,25 м з урахуванням щільності даних і потрібної деталізації подальших розрахунків [43]. Далі виконували нормалізацію хмари точок, тобто перерахунок абсолютних висот Z у відносні висоти щодо ЦМР. Цей етап є принциповим для лісових задач, оскільки саме нормалізовані висоти коректно описують вертикальну структуру деревостану висоти дерев незалежно від перепадів рельєфу.

На основі нормалізованої хмари точок будували СНМ, як растр, у якому для кожної комірки фіксується висота верхньої межі пологоу максимальні або репрезентативні значення Z у межах пікселя. СНМ для першої хмари точок формували з роздільною здатністю 0,25 м, що дозволяло перейти до подеревних процедур виявлення верхівок дерев. Після побудови СНМ проводили подеревну ідентифікацію (*Individual Tree Detection*). З використанням *Local Maximum Filter* із фіксованим розміром вікна пошуку 3 м ($ws = 3$), де локальні максимуми на СНМ трактуються як потенційні вершини дерев. Такий підхід є одним із класичних для ідентифікації дерев на основі СНМ і широко застосовується у дослідженнях, хоча його чутливість до параметра вікна вимагає узгодження з породою, віком і зімкнутістю пологоу [24, 44].

Для сегментації дерев і подальших обчислень таксаційних метрик використовували процедури, що працюють із атрибутом ідентифікатора дерева у хмарі точок. Ключова вимога тут – щоб сегментація була виконана до розрахунку

таксаційних показників, і обчислення мають проходити саме для сегментованого об'єкта (дерева).

Для просторових операцій та роботи з полігонами/межами ділянок, переведення систем координат, застосовували пакет *sf*, який реалізує стандарт Simple Features для векторних геоданих у R, а для растрових продуктів – пакет *terra*. Підготовка табличних результатів і структуризація метрик виконувалися із використанням *dplyr*, а 3D-візуалізація хмар точок і сегментованих дерев — засобами *rgl*.

Висновки до розділу 2.

1. Обраний об'єкт дослідження – стиглий сосновий деревостан у межах Малоцвілянського лісництва Звягельського надлісництва ДП «Ліси України» – є репрезентативним для умов Українського Полісся за природно-кліматичними, лісотипологічними та господарськими характеристиками. Це забезпечує можливість узагальнення отриманих результатів і їх застосування для аналогічних соснових насаджень державного лісового фонду України.

2. Поєднання традиційної перелікової таксації з сучасними методами повітряного та мобільного лазерного сканування створило надійну методичну основу для порівняльної оцінки результатів інвентаризації.

3. Запропонована методика обробки лідарних даних, яка включає класифікацію наземних точок, побудову цифрової моделі рельєфу, нормалізацію висот, формування СНМ та подеревну ідентифікацію, є послідовною, відтворюваною та узгодженою з сучасними науковими підходами. Застосування відкритого програмного забезпечення у середовищі R у поєднанні з професійними інструментами обробки хмар точок забезпечує практичну придатність методики для використання в лісовому господарстві та подальших наукових дослідженнях.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗУ

3.1. Характеристика отриманих хмар точок та 3D-моделей.

У процесі обробки результатів лазерного сканування було сформовано сукупність хмар точок, що відображають просторову структуру соснового деревостану на рівні окремих дерев і всього насадження. Хмари точок представлені у тривимірному просторі з координатами X, Y, Z та додатковими атрибутами, що дозволило виконувати як геометричний аналіз, так і подальші таксаційні розрахунки.

Отримані хмари точок характеризуються високою деталізацією піднаметового простору, що є особливо важливим для інвентаризації соснових деревостанів, де значну роль відіграють параметри стовбурів і їх просторове розміщення. За результатами обробки встановлено, що щільність точок у межах дослідної ділянки є достатньою для подеревної сегментації, а також для побудови цифрових моделей рельєфу та висоти пологів.

Лідарне знімання досліджуваної території було виконане двома способами:

Перший із використанням квадрокоптера DJI Matrice300RTK з фотолідарною камерою DJI Zenmuse L1 (Рис.3.1).

Характеристики отриманої хмари точок:

- кількість точок – 19 494 458;
- площа знімання – 163 824 м²;
- щільність імпульсів – 68,26 імпульсів/м²;
- щільність точок – 119 точок/м².

Особливістю вказаної хмари точок є те, що окремі ділянки лісового покриву (розташовані по краях смуг, по яких проводилося знімання) були зняті не повністю – не були зняті верхні частини лісового покриву на таких ділянках, що візуально відображається у вигляді лінійних «провалів» у хмарах точок (рис.

3.2). Вказана особливість може мати певний вплив на точність результатів аналізу відповідної хмари точок.

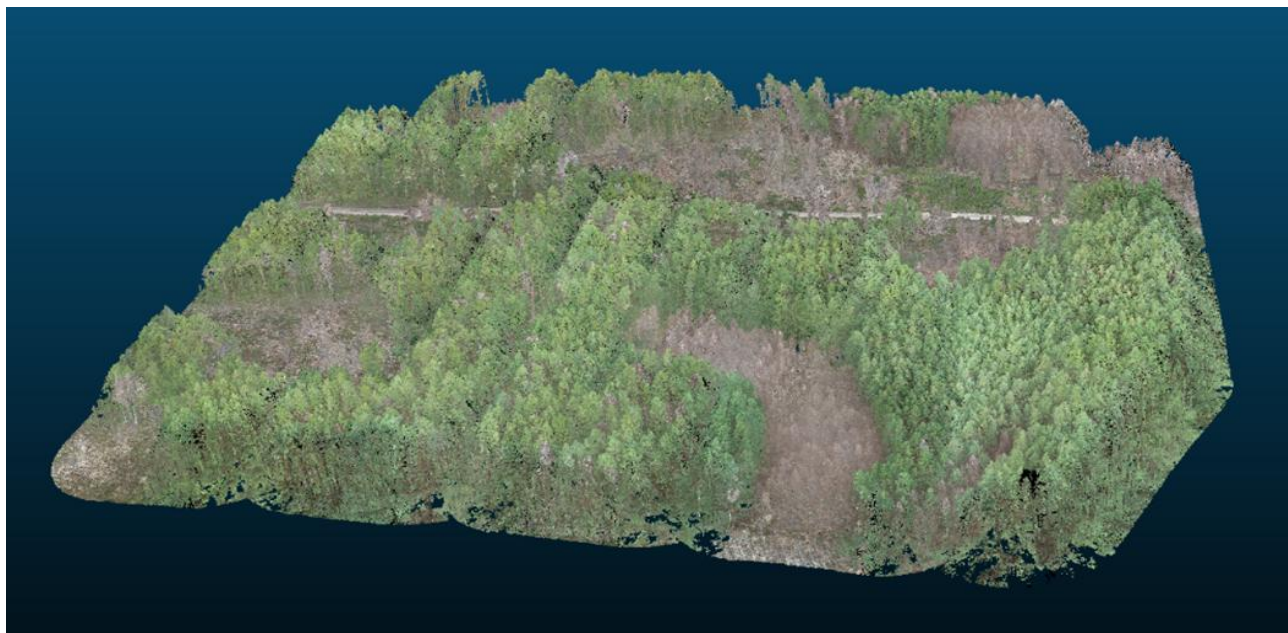


Рис. 3.1. Візуалізації хмари точок, отриманої з використанням квадрокоптера DJI Matrice300RTK з фотолідарною камерою DJI Zenmuse L1 в оптичному спектрі

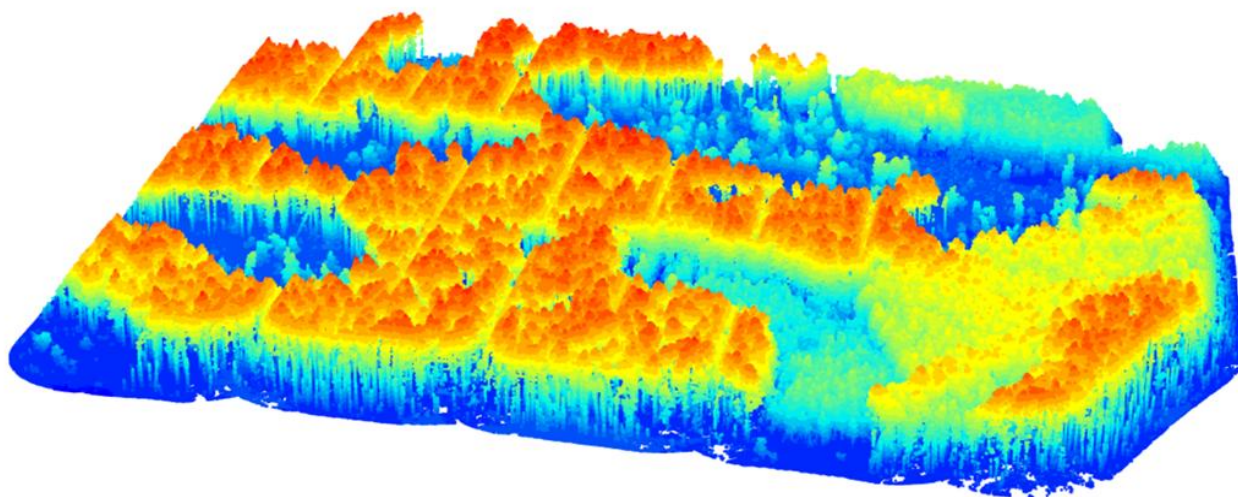


Рис. 3.2. Візуалізації хмари точок, отриманої з використанням квадрокоптера DJI Matrice300RTK з фотолідарною камерою DJI Zenmuse

Другий спосіб із використанням переносного наземного лідара AlphaGeo Slam R100 (рис. 3.3). Характеристики отриманої хмари точок: – кількість точок – 75 091 997; – площа знімання – 78912 м²; – щільність точок – 951,59 точок/м².

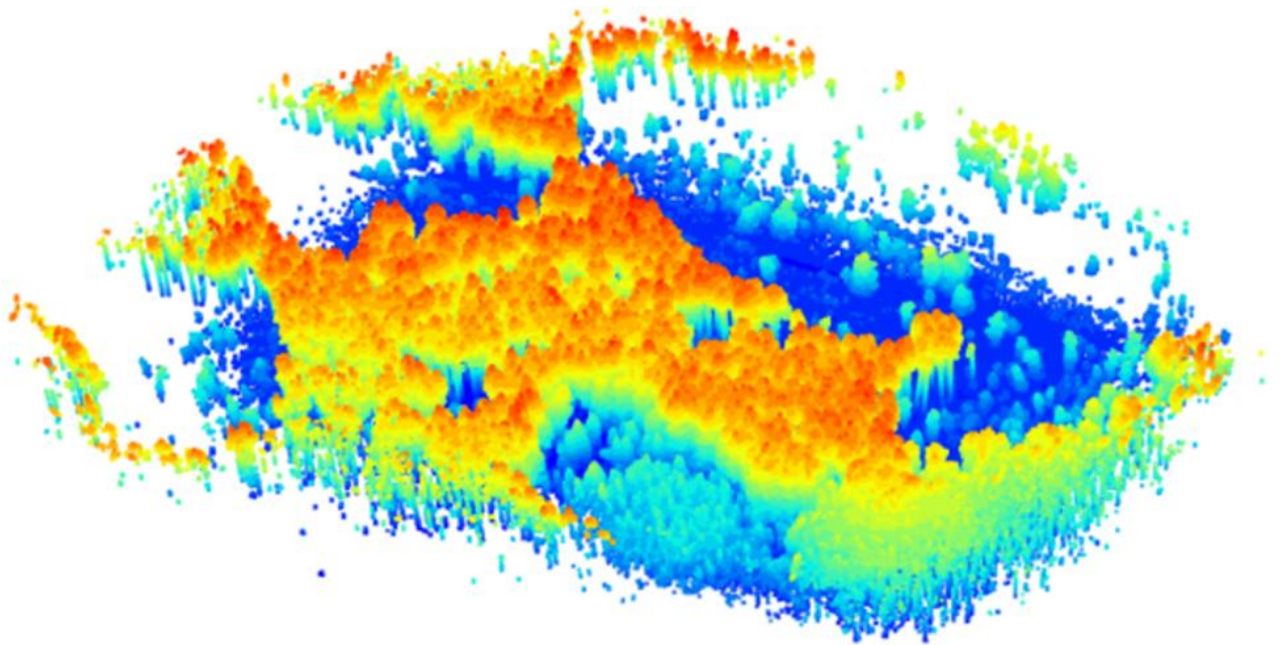


Рис. 3.3. Візуалізація хмари точок, отриманої з використанням мобільного наземного лідара AlphaGeo Slam R100

Статистичний аналіз хмар точок включав оцінку загальної кількості точок, середньої та локальної щільності, а також розподілу точок за висотними інтервалами. Висотний розподіл відбиттів свідчить про чітке виділення декількох вертикальних ярусів деревостану, що є типовим для стиглих соснових насаджень Полісся. Наявність достатньої кількості відбиттів від поверхні ґрунту дозволила коректно класифікувати наземні точки та побудувати цифрову модель рельєфу з високою просторовою точністю.

Після класифікації наземних точок і нормалізації висот було сформовано похідні 3D-моделі, зокрема ЦМР) та СНМ (Рис. 3.4). Ці моделі є ключовими продуктами лазерного сканування у лісовому господарстві, оскільки дозволяють перейти від сирих вимірювань до інтерпретованих показників структури деревостану. Просторова роздільна здатність моделей була підібрана з урахуванням щільності хмар точок і забезпечувала достатню деталізацію для подеревного аналізу.

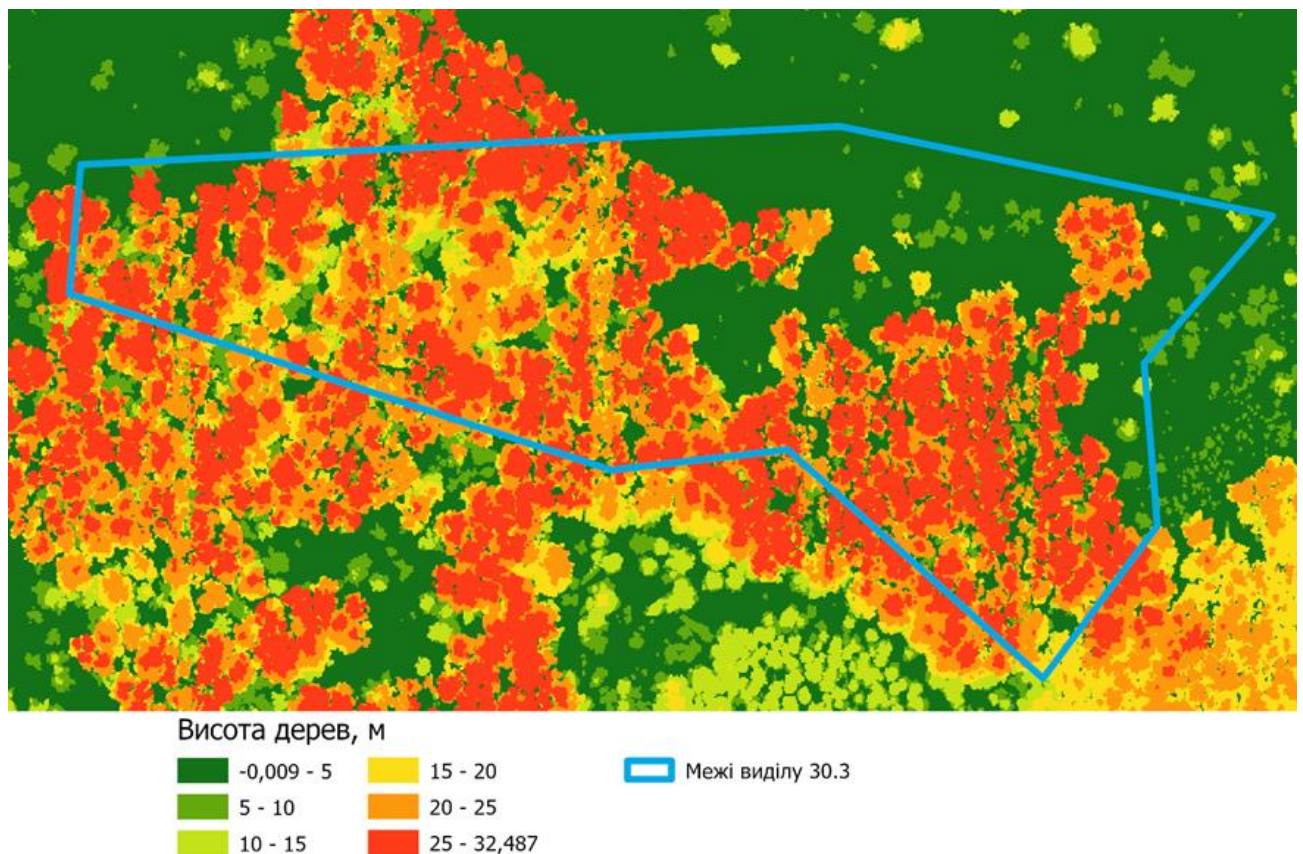


Рис. 3.4. Canopy Height Model для знімання з фотолідарної камери DJI Zenmuse L1 (роздільна здатність – 0,25 м)

Виділення окремих дерев проводилося на основі отриманої нормалізованої хмари точок з використанням алгоритму. Результати виділення окремих дерев при розмірі «вікна» 3 м ($ws=3$) подані на рис. 3.5. Згідно з результатами *Individual Tree Detection*, в межах виділу 30.3 кварталу 35 Малоцвілянського лісництва (позначений синім контуром) ідентифіковано 449 дерев. Середня висота дерев – 24,2 м. Серед вказаних дерев висоту понад 10 м мають 394 дерева, а середня висота дерев висотою понад 10 м становить 27,0 м (рис. 3.6).

За результатами відводу ділянки в рубку, який проведений 30.03.2023 року, на ділянці заміряно 583 дерева, які підлягають вирубуванню (сосна – 520 дерев, дуб – 26, береза – 37 дерев (з яких 7 неліквідних)) та 14 дерев сосни, які залишаються на лісосіці.

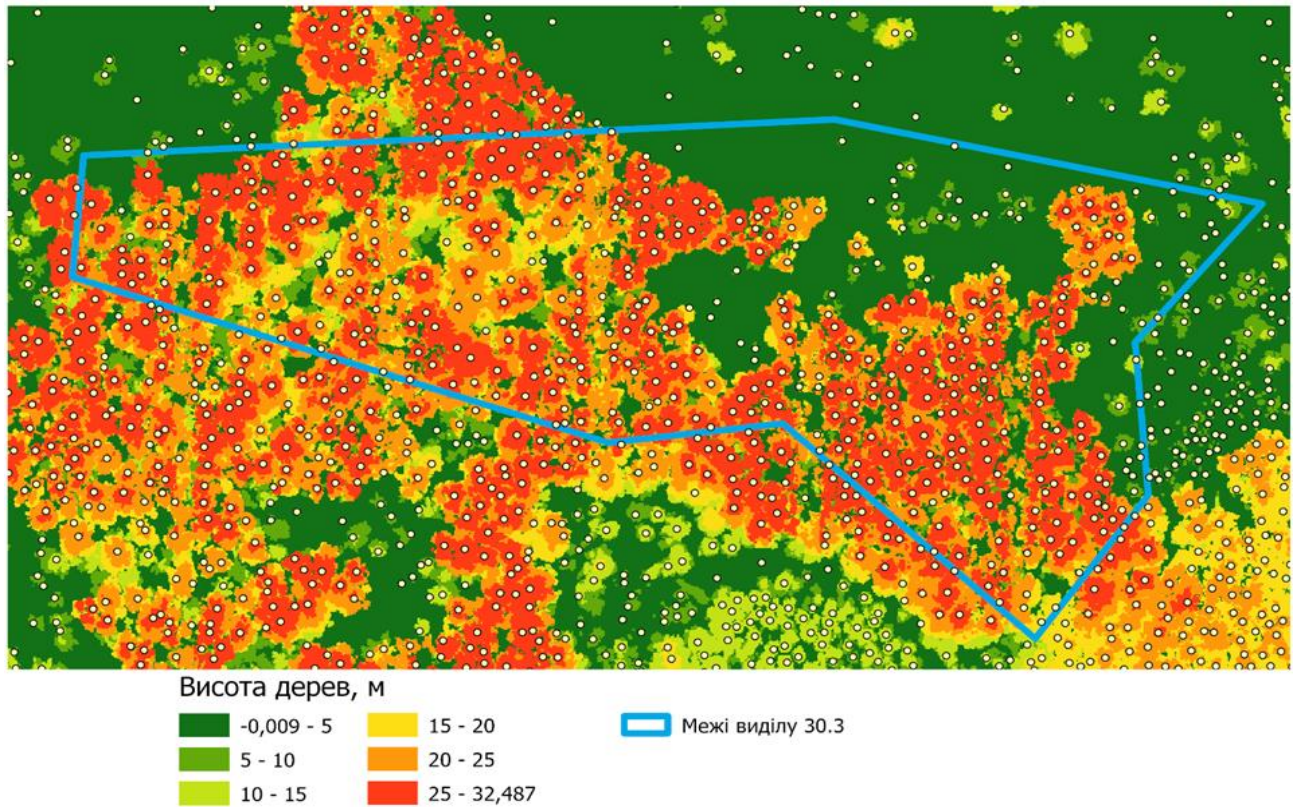


Рис. 3.5. Результати Individual Tree Detection для знімання з фотолідарної камери DJI Zenmuse L1 (алгоритм Local Maximum Filter, ws=3)

Отже, за результатами Individual Tree Detection у пакеті lidR, ідентифіковано 75,2% дерев порівняно з даними перелікової таксації.

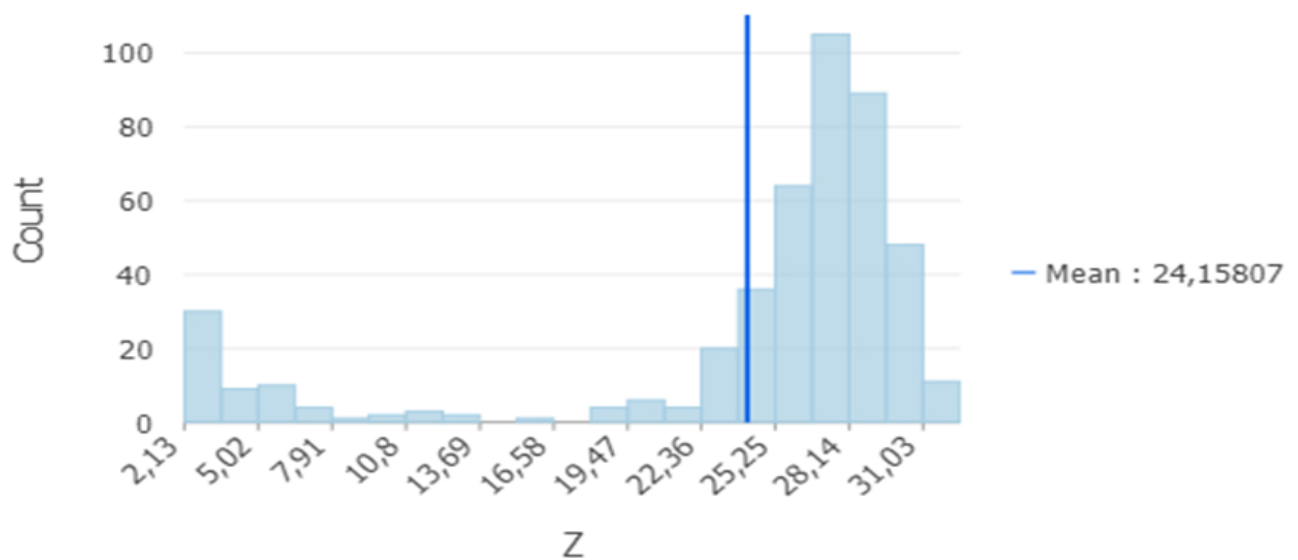


Рис. 3.6. Розподіл за висотою дерев, виділених в пакеті lidR на основі знімання з фотолідарної камери DJI Zenmuse L1 (алгоритм Local Maximum Filter, ws=3).

Однак, як можемо бачити на рис. 3.6. автоматично розраховане значення середньої висоти не описує середню висоту соснового деревостану та потребує додаткового вписування класичної формули визначення середньої висоти через площу поперечного перерізу середнього дерева.

Якість отриманих 3D-моделей оцінювалася за рівнем шуму, наявністю прогалин у покритті та узгодженістю геометрії між різними частинами ділянки. Візуальний аналіз моделей показав відсутність значних деформацій і систематичних зсувів, що свідчить про стабільну роботу системи лазерного сканування та коректність алгоритмів обробки.

Візуалізація хмар точок і похідних моделей виконувалася у дво- та тривимірному форматах, що дозволило наочно оцінити просторову будову деревостану та результати сегментації окремих дерев. 3D-візуалізації є важливим етапом аналізу, оскільки вони дозволяють виявляти локальні помилки, пов'язані з недостатнім покриттям або перекриттям об'єктів, а також слугують інструментом експертної перевірки автоматизованих результатів. У лісових

дослідженнях такі візуалізації широко застосовуються для контролю якості та інтерпретації складних просторових структур.

Окрему увагу приділено оцінці якості сканування в умовах піднаметового простору, де на результати істотно впливають зімкнутість пологів, наявність підросту та чагарникового ярусу. Аналіз показав, що найбільша щільність точок зосереджена на стовбурах дерев у діапазоні робочих висот, що створює передумови для надійного визначення діаметрів і просторового положення дерев. Водночас у верхніх частинах крон щільність точок є нижчою, що відповідає загальновідомим особливостям мобільного лазерного сканування у лісових умовах.

3.2. Розраховані таксаційні показники з даних мобільного лазерного сканування.

Виконаний аналіз хмари точок, отриманої за допомогою переносного наземного лідара AlphaGeo Slam R100, в програмному забезпеченні Terrasolid (пакет TerraScan). В результаті були ідентифіковані окремі дерева та визначені їхні координати, висоти, діаметр крони та діаметр стовбура. Візуалізація результатів ідентифікації окремих дерев для хмари точок з переносного наземного лідара подана на рис. 3.7.

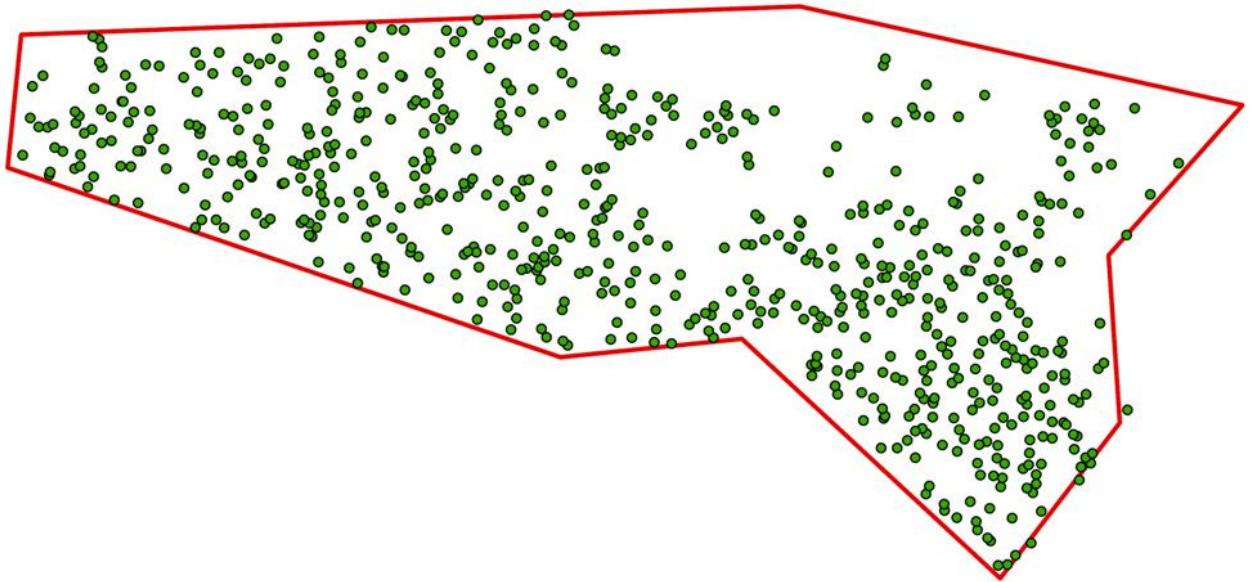


Рис. 3.7. Результати ідентифікації окремих дерев за хмарою точок з переносного наземного лідара AlphaGeo Slam R100 в Terrasolid

Згідно з результатами аналізу, в межах виділу 30.3 кварталу 35 Малоцвілянського лісництва ідентифіковано 511 дерево висотою понад 10 м або 599 дерев висотою понад 5 м і діаметром стовбура від 0,05 м. Середня висота ідентифікованих дерев (висотою понад 10 м) – 25,3 м і (висотою понад 5 м) – 21,5 м (рис. 3.8). Розподіл визначених діаметрів на висоті 1.3 метра (рис.3.9) відображає діаметри розпіднаних дерев та демонструє кілька завищених показників діаметра, що можуть відноситись до викидів у випадку застосування правила трьох сигм.

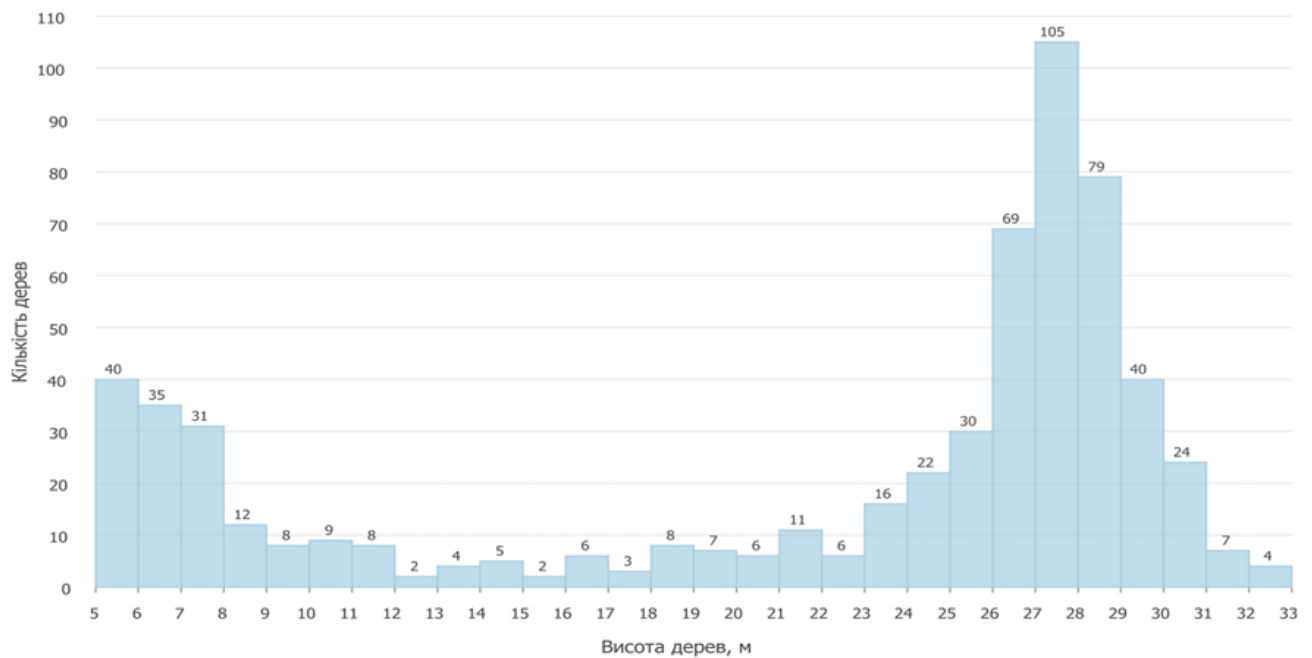


Рис. 3.8. Розподіл за висотою дерев, виділених в Terrasolid, на основі даних ручного лазерного сканування

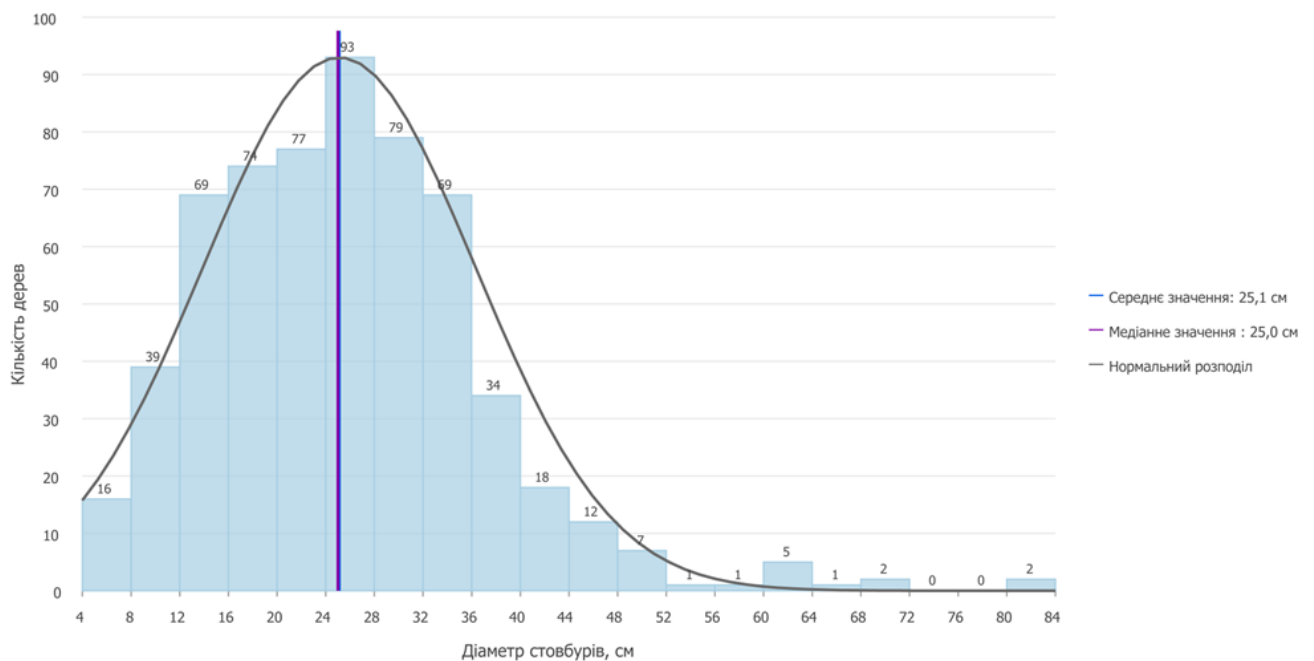


Рис. 3.9.. Розподіл за діаметром дерев, виділених в Terrasolid в межах виділу 30.3 на основі хмари точок з наземного лідара.

Для 54 ідентифікованих дерев пакет TerraScan не визначив діаметр стовбура (для цього показника вказано значення «0,00»). Причиною цього може

бути занадто малий діаметр стовбурів відповідних дерев та/або недостатня кількість інформації, отриманої під час зйомки, для коректного визначення діаметрів відповідних дерев. Для 1 ідентифікованого дерева визначений діаметр стовбура склав 0,03 м

3.3. Порівняння результатів лазерного сканування та даних перелікової таксації відводу.

Згідно з польовою переліковою відомістю дерев, призначених у рубку, в межах виділу 30.3 кварталу 35 Малоцвілянського лісництва філії «Звягельське ЛГ» ДП «Ліси України» виявлено 583 дерева, які підлягають вирубуванню і 14 дерев, які не підлягають вирубуванню. Таким чином, загальна кількість дерев в межах виділу 30.3, згідно матеріалів таксації, становила 597 (табл.1).

Таблиця 1.

Розподіл дерев визначених матеріалами відводу за ступенями товщини

Ступінь товщини	Кількість дерев	Ступінь товщини	Кількість дерев
8	2	36	59
12	20	40	32
16	51	44	18
20	62	48	7
24	111	52	1
28	111	Разом	597
32	123		
Середнє значення ступеню товщини	27,8	Середній діаметр	28,9

Для додаткової перевірки результатів ідентифікації дерев було розглянуто окремі хмари точок для кожного ідентифікованого дерева виділені у програмному забезпеченні Terrasolid, в ході поділу єдиної хмари точок, отриманої в результаті наземного лідарного знімання. Всього в процесі ідентифікації дерев вказана хмара точок в межах виділу 30.3 була поділена на 863 окремі хмари. Для подальшого аналізу було відібрано 669 хмар. Інші 194

хмари – це невеликі за розмірами хмари, які відповідають або реальним деревам висотою до 5 м, або фрагментам інших дерев висотою до 5 м, які помилково були ідентифіковані програмою як окремі дерева.

Далі візуально порівнювалися окремі дерева, ідентифіковані програмою і відображені у вигляді точок на земній поверхні, з хмарами, які просторово відповідають цим точкам. В цілому спостерігається закономірність – чим більше дерево за діаметром стовбура та висотою, тим з більшою ймовірністю воно буде правильно ідентифіковане програмою і тим коректніше для нього буде виділена відповідна хмара точок.

Зокрема, для всіх 27 дерев з найбільшим діаметром стовбура (0,45 м і більше, згідно результатів обчислень програми) була коректно виділена відповідна хмара точок. Лише в 3 хмарах точок з 27 були виявлені значні помилки при їх виділенні (помилки переважно полягали в тому, що до цих хмар точок помилково був приєднаний прилеглий низькорослий деревний чи чагарниковий покрив та/або в частковому «обрізанні» крон дерев) (рис. 3.10).

Водночас з 42 дерев з діаметром стовбура від 0,05 до 0,10 см (згідно обчислень програми) в цілому коректно відповідні хмари точок були виділені для 38 дерев, а в 4 випадках виділені хмари точок візуально не виглядають як дерева. При цьому з 38 вказаних відносно коректно виділених хмар точок лише 18 не мають значних помилок. В решті 20 хмарах точок були виявлені значні помилки (приєднання до хмари точок прилеглого чагарникового покриву, об'єднання кількох дерев в одну хмару точок, «обрізання» крони дерева або, навпаки, «приєднання» до хмари точок фрагментів крон сусідніх дерев).



Рис.3.10.. Приклади хмар точок окремих дерев з діаметром стовбура від 0,45 м (згідно обчислень програми), виділених в цілому коректно (ліворуч) та з явними помилками (праворуч).

Якщо розглядати ідентифіковані дерева, для яких програма не змогла визначити діаметр стовбура (вказано значення діаметра «0»), то більшість таких дерев ідентифіковані помилково. З 54 таких «дерев», ідентифікованих програмою, лише для 12 можна візуально підтвердити, що це дійсно дерева

(причому для всіх їх хмари точок виділені зі значними помилками). Решті ідентифікованих «дерев» з визначеним значенням діаметра 0 візуально відповідають окремі фрагменти інших дерев, тобто фактично це не є реальні дерева. Таким чином, при аналізі результатів ідентифікації окремих дерев є виправданим не враховувати ті дерева, для яких програма не змогла визначити діаметр. Такий підхід призводить до неврахування певної кількості невеликих дерев (висотою менше 10 м), але дозволяє уникнути помилкової ідентифікації значно більшої кількості неіснуючих дерев.

Загалом, якщо не враховувати дерева, для яких програма не змогла визначити діаметр, то в цілому вона правильно ідентифікує реально існуючі дерева – лише в одиничних випадках ідентифіковані дерева при візуальній перевірці виявилися фрагментами інших дерев. Водночас спостерігається певне недоврахування невеликих дерев (висотою до 10 м) (для виділу 30.3 воно може встановити орієнтовно кілька десятків таких дерев).

Водночас якщо розглядати точність виділених хмар для окремих дерев, то вона не завжди є високою, навіть для великих дерев. Найпоширеніші помилки при виділенні хмар окремих дерев:

- «обрізання» крон дерев, особливо там, де крони сусідніх дерев перекриваються;
- «приєднання» до крон чи стовбура дерева фрагментів сусідніх дерев;
- «приєднання» до більшого дерева прилеглих менших дерев та/або чагарників;
- «розріджені» верхні частини крон дерев.

Внаслідок цих та деяких інших менш поширених помилок отримані хмари дерев часто виходять спотвореними, що погіршує точність визначення характеристик дерев (висоти, діаметра стовбура, діаметра крони тощо).

Зокрема, спостерігаються досить значні відхилення між результатами вимірювання діаметрів дерев в ході наземного лідарного знімання та даними польових досліджень. Наприклад, за даними наземного лідара в межах виділу

30.3 зафіксовано 2 дерева з діаметром стовбура 0,83-0,84 м та 9 дерев з діаметром 0,57-0,68 м (див. рис. 3.9). Водночас, за даними польової перелікової відомості, в межах виділу 30.3 є тільки 1 дерево зі ступенем товщини 52, а товщина всіх інших дерев є меншою (табл.1).

Висновки до розділу 3

1. Лазерне сканування забезпечує детальне відтворення просторової структури соснового деревостану, однак якість і повнота отриманих даних суттєво залежать від типу платформи та умов знімання. Повітряне лідарне знімання з використанням DJI Zenmuse L1 забезпечило суцільне покриття території та коректне формування цифрових моделей рельєфу і висоти пологу, але виявило обмеження щодо повноти відображення верхніх частин пологу на крайових ділянках. Натомість мобільне наземне лазерне сканування AlphaGeo SLAM R100 сформувало надзвичайно щільну хмару точок у піднаметовому просторі, що є критично важливим для аналізу стовбурів і подеревних таксаційних показників.

2. Ефективність автоматичної ідентифікації дерев залежить від розмірів дерев та складності структури насадження. За результатами Individual Tree Detection з повітряних лідарних даних було ідентифіковано близько 75 % дерев порівняно з переліковою таксацією, при цьому найбільша частка пропусків припадає на пригнічені та дрібні дерева. Аналіз наземних лідарних даних показав значно кращу ідентифікацію великих і середніх дерев, тоді як для дерев малих діаметрів та фрагментів крон зростає ймовірність помилкової сегментації або некоректного визначення параметрів. Це підтверджує, що автоматизовані алгоритми найбільш надійно працюють у відношенні домінуючого ярусу деревостану.

3. Розрахунок таксаційних показників з даних мобільного лазерного сканування є перспективним, але потребує критичної фільтрації результатів.

Висоти дерев та їх просторове положення визначаються з високою надійністю, тоді як оцінка діаметрів стовбурів є чутливою до якості сегментації хмар точок. Виявлені випадки суттєвого завищення діаметрів і появи «дерев» з нульовими або некоректними значеннями свідчать про необхідність виключення таких об'єктів з аналізу та обов'язкової візуальної або статистичної валідації результатів.

4. Порівняння результатів лазерного сканування з матеріалами перелікової таксації показало як високий потенціал технології, так і її сучасні обмеження. Наземне лазерне сканування добре відтворює загальну структуру деревостану та параметри великих дерев, але поки що не може повністю замінити класичну перелікову таксацію, особливо для точного визначення діаметральної структури та обліку дрібних дерев. Найбільш обґрунтованим підходом на сучасному етапі є комбіноване використання мобільного лазерного сканування як інструменту детального просторового аналізу та прискорення інвентаризаційних робіт у поєднанні з традиційними наземними методами контролю.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи встановлено, що мобільне лазерне сканування на основі технології SLAM є перспективним інструментом для інвентаризації соснових деревостанів, оскільки дозволяє оперативно отримувати детальну тривимірну інформацію про просторову структуру насаджень без розгортання стаціонарних сканерів і без необхідності використання GNSS-приймачів у кожній точці вимірювання. Це особливо актуально для умов Українського Полісся, де доступність ділянок, зімкнутість пологів та наявність підросту ускладнюють застосування класичних методів таксації.

2. Проведений аналіз теоретичних джерел показав, що традиційна лісова таксація залишається фундаментом лісогосподарського планування, проте має низку обмежень, пов'язаних із високою трудомісткістю, суб'єктивністю окремих оцінок та обмеженою оперативністю оновлення даних. У цьому контексті мобільне лазерне сканування розглядається не як повна заміна класичних методів, а як інструмент їх доповнення, що розширює можливості цифровізації лісової інвентаризації.

3. Поєднання повітряного лазерного сканування з використанням DJI Zenmuse L1 та наземного мобільного сканування AlphaGeo SLAM R100 дозволило комплексно охарактеризувати деревостан. Повітряний LiDAR забезпечив суцільне покриття території та формування цифрових моделей рельєфу і висоти пологів, тоді як мобільне наземне сканування сформувало надзвичайно щільну хмару точок у піднаметовому просторі, що є критично важливим для аналізу стовбурів дерев.

4. У результаті обробки лідарних даних сформовано нормалізовані хмари точок, цифрові моделі рельєфу та висоти пологів, а також виконано подеревну ідентифікацію. Встановлено, що якість отриманих 3D-моделей є достатньою для подальших таксаційних розрахунків, а статистичні

характеристики хмар точок свідчать про чітке відображення вертикальної структури соснового деревостану.

5. За результатами Individual Tree Detection з даних повітряного лазерного сканування ідентифіковано близько 75 % дерев порівняно з матеріалами перелікової таксації. Найбільша частка неврахованих дерев припадає на пригнічені та дрібні особини, що підтверджує обмеження алгоритмів автоматичної ідентифікації в умовах зімкнутого пологу.

6. Аналіз даних мобільного наземного лазерного сканування показав вищу ефективність ідентифікації великих і середніх дерев, а також значно кращу деталізацію стовбурів. Водночас для дерев малих діаметрів та у випадках складної просторової структури виявлено помилки сегментації, зокрема «приєднання» фрагментів сусідніх дерев або підросту, що впливає на точність визначення діаметрів.

7. Розрахунок таксаційних показників з даних мобільного лазерного сканування продемонстрував, що висоти дерев та їх просторове положення визначаються з високою надійністю, тоді як оцінка діаметра стовбура є чутливою до якості сегментації хмар точок. Виявлені випадки завищення діаметрів та появи об'єктів з нульовими значеннями свідчать про необхідність обов'язкової фільтрації та візуальної або статистичної валідації результатів.

8. Порівняння результатів лазерного сканування з матеріалами перелікової таксації показало, що мобільне лазерне сканування не може повністю замінити класичну таксацію, особливо для точного визначення діаметральної структури та обліку дрібних дерев. Водночас технологія демонструє високий потенціал для прискорення інвентаризаційних робіт і підвищення просторової деталізації даних.

9. Отримані результати мають практичну цінність для лісогосподарських підприємств та наукових установ і можуть бути використані при впровадженні цифрових технологій інвентаризації соснових деревостанів, розробці методичних рекомендацій та подальших дослідженнях у напрямі

інтеграції мобільного лазерного сканування в систему національної інвентаризації лісів України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Pretzsch H. Forest Dynamics, Growth, and Yield. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Ред. Pretzsch H. Berlin, Heidelberg:Springer, 2009. С. 1–39.
2. Інструктивно-методичні вказівки щодо здійснення лісовпорядкування. Ірпінь: ВО «Укрдержліспроект»:2024. 161 с.
3. Миронюк В. В., Свинчук В. А., Білоус А. М., Василишин Р. Д. Лісова таксація: навчальний посібник. К.: НУБіП України, 2019. 220 с.
4. Букша І. Ф., Сторожук В. Ф., Пастернак В. П., Пивовар Т. С., Букша М. І., Яроцький В. Ю. Інструкція з проведення національної інвентаризації лісів України. Харків-Ірпінь:2014. 80 с.
5. Picard N., Saint-André L., Henry M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [u.a.], 2012. 207 с. ISBN 978-92-5-107347-6.
6. В. В. Миронюк, В. А. Свинчук Лісова таксація: конспект лекцій для студентів напряму підготовки: 6.090103 – «Лісове і садово-паркове господарство» [видання друге, доп.]. НУБіП України, 2016. 104 с.
7. Миронюк В. В. Оцінювання площі лісів України за даними глобальних карт лісового покриття. Київ:2017.
8. Мусієнко Ю. М. Поширення та продуктивність сосни веймутової (*Pinus Strobus* L.) в Україні. *Збірник науково-технічних праць*. 2015. С. 72–78.
9. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку здійснення лісовпорядкування» № 112. 2023.
10. Сторожук В. Національна інвентаризація лісів: оцінка лісового фонду Сумської та Івано-Франківської областей. *Лісовий і мисливський журнал*. 2014. Вип. 3. С. 4–5.
11. Henttonen H. M., Kangas A. Optimal plot design in a multipurpose forest inventory. *Forest Ecosystems*. 2015. Вип. 2, № 1.
12. Свинчук В. А., Строчинський А. А., Миронюк В. В., Гірс О. А. Особливості просторово-параметричної структури соснових деревостанів залежно від їхнього походження. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2010. Вип. 6, № 22.

13. Постанова Кабінету Міністрів України «Деякі питання проведення національної інвентаризації лісів у період воєнного стану» № 388. 2023.
14. Гайно П. Технічна підтримка національної інвентаризації лісів в Україні. Київ:2022. 22 с.
15. Миронюк В. В. Сезонна динаміка спектральних характеристик земного покриву та її роль у дешифруванні лісових насаджень за знімками Landsat. *Науковий вісник НУБіП України*. 2017. Вип. 266. С. 54–64.
16. Миронюк В. В. Класифікація лісового покриву за сезонними композитними мозаїками Landsat. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Вип. 28, № 1. С. 28–33.
17. Миронюк В. В., Білоус А. М., Дячук П. П. Дешифрування таксаційних показників деревостанів на основі k-NN методу. Київ:2018.
18. Bilous A., Myroniuk V., Holiaka D., Bilous S., See L., Schepaschenko D. Mapping growing stock volume and forest live biomass: a case study of the Polissya region of Ukraine. *Environmental Research Letters*. 2017. Вип. 12, № 10. С. 13.
19. Веб ресурс [Sentinel-2 L2A]. .
20. Wehr A., Lohr U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999. Вип. 54, № 2. С. 68–82.
21. Wehr A., Lohr U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999. Вип. 54, № 2. С. 68–82.
22. Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Vastaranta M., Holopainen M., Kukko A., Kaartinen H., Jaakkola A., Vaaja M., Koskinen J., Alho P. Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*. 2012. Вип. 4, № 5. С. 1190–1207.
23. Bazezew M. N., Hussin Y. A., Kloosterman E. H. Integrating Airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. Вип. 73. С. 638–652.
24. Roussel J.-R., Auty D., Coops N. C., Tompalski P., Goodbody T. R. H., Meador A. S., Bourdon J.-F., Boissieu F. de, Achim A. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*. 2020.

Вип. 251. С. 112061.

25. Vytseha R. R., Zajaczkowski G. The usage of mobile laser scanning technologies for the estimation of forestry and forest inventory indexes of the forest stands. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects*. 2024.
26. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms. .
27. Trion S1 Handheld LiDAR 3D Scanner, 0.8-2 cm High Accuracy. .
28. Zhang J., Singh S. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. Robotics: Science and Systems Foundation, 2014. ISBN 978-0-9923747-0-9.
29. Nechyporenko O., Korpan Y. Research of methods and technologies for determining the position of the mobile object in space. *Technology audit and production reserves*. 2018. Вип. 6, № 2(44). С. 4–10.
30. Wu Y., Zhong S., Ma Y., Zhang Y., Liu M. Application of SLAM-Based Mobile Laser Scanning in Forest Inventory: Methods, Progress, Challenges, and Perspectives. *Forests*. 2025. Вип. 16, № 6. С. 920.
31. A-GEO α -GEO slam R100 – introduction to the best handheld scanner of 3D “slam” technology. – A-GEO. 2025.
32. Mobile Mapping Hardware. .
33. Мамонov К. Системи мобільного лазерного сканування в геоінформаційних технологіях. 2025.
34. Wu Y., Zhong S., Ma Y., Zhang Y., Liu M. Application of SLAM-Based Mobile Laser Scanning in Forest Inventory: Methods, Progress, Challenges, and Perspectives. *Forests*. 2025. Вип. 16, № 6. С. 920.
35. Proudman A., Ramezani M., Digumarti S. T., Chebrolu N., Fallon M. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. Вип. 157. С. 104240.
36. Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. .
37. Zhou T., Zhao C., Wingren C. P., Fei S., Habib A. Forest feature LiDAR SLAM (F2-LSLAM) for backpack systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2024. Вип. 212. С. 96–121.

38. Kükenbrink D., Marty M., Rehush N., Abegg M., Ginzler C. Evaluating the potential of handheld mobile laser scanning for an operational inclusion in a national forest inventory – A Swiss case study. *Remote Sensing of Environment*. 2025. Вип. 321. С. 114685.
39. Савущик М. П., Попков М. Ю. Типологічна структура лісів Українського Полісся. 2008.
40. Клімат України. Київ:Видавництво Раєвського, 2003. 343 с. с.
41. Вороний А. О., Лазерне сканування у сосновому деревостані. Студентські наукові читання – 2025: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. присвячені I-му туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт (10 грудня 2025 р.). Житомир: Поліський національний університет. С.11.
42. Вороний А. О., Можливості застосування SLAM технологій у лісовому господарстві. Форум «Green & Digital Polissia: Ecology & Forestry». 17 червня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет.С. 54-56
43. Вороний А. О., Перспективи використання технологій LIDAR та SLAM сканування у лісових насадженнях. Міжнародна науково-практична конференція «Лісівнича освіта та наука в умовах національних викликів та європейської інтеграції України». (5 – 6 червня 2025 року). Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України. С.54-55.
44. Задорожнюк Р. М., Дячук П. П. Можливості ідентифікації дерев сосни звичайної за знімками високої роздільної здатності. 2021.

