

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра лісового та садово-паркового господарства
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ЛАГОВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 630.5

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЕКСПРЕС МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛЬОВОГО ДІАМЕТРА

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

_____Лаговський В.Ю.

Керівник роботи

Кульман Сергій Миколайович
кандидат техн. наук, доцент

Житомир-2025

Висновок кафедри лісового та садово-паркового господарства за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри лісового та садово-паркового господарства
№ __7__ від «__08__» __12__ 2025 р.

Завідувач кафедри лісового та садово-паркового господарства

к.с.-г. н., доцент _____ Сірук Юрій Вікторович

«__7__» ____08__ 2025 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Лаговський Віталій Юрійович захистив кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК _____

АНОТАЦІЯ

Лаговський Віталій Юрійович. Експрес метод визначення цільового діаметра. - Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У кваліфікаційній роботі розглядається питання порівняльного аналізу статистичної достовірності та економічної ефективності експрес-методу LiDAR у визначенні ключових таксаційних параметрів стосовно традиційних польових методів. Дослідження проводили у 2025 р. на дослідній ділянці змішаного насадження (Сосна звичайна, Дуб звичайний). Об'єктом дослідження виступали таксаційні параметри 60 стовбурів дерев, отримані за допомогою мобільного лазерного сканування та мірної вилки з висотоміром.

Ключові слова: LiDAR, лазерне сканування, лісова таксація, діаметр, висота, об'єм стовбура, достовірність, економічна ефективність, змішані насадження.

ANNOTATION

Lahovskyi V. Yu. Express method for target diameter determination. - Qualification work on manuscript rights.

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

The Master's thesis examines the comparative analysis of the statistical reliability and economic efficiency of the LiDAR express method in determining key stand parameters relative to traditional field methods. The research was conducted in 2025 on an experimental plot of a mixed stand (Scots Pine, English Oak). The object of the study was the stand parameters of 60 tree stems, obtained using mobile laser scanning and a diameter tape/caliper with an altimeter.

Keywords: LiDAR, laser scanning, forest mensuration (or forest inventory), diameter, height, stem volume, reliability, economic efficiency, mixed stands.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛЬОВОГО ДІАМЕТРА ТА КРИТЕРІЇВ СТИГЛОСТІ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ	9
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	14
2.1. Характеристика досліджуваної ділянки	14
2.2. Методи проведення дослідження	16
2.3. Обсяг польових робіт та детальна характеристика досліджень.....	18
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	21
3.1. Результати дескриптивного аналізу таксаційних параметрів.....	21
3.2. Економічна ефективність та оцінка оперативності застосування методу LIDAR.....	32
ВИСНОВКИ.....	34
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА ЛІТЕРАТУРИ.....	37
ДОДАТОК А	Помилка! Закладку не визначено.
Теоретичні критерії стиглості лісу та їх економічне значення.....	Помилка! Закладку не визначено.

ВСТУП

В Україні лісове господарство відіграє критичну роль у забезпеченні екологічної стійкості, економічного розвитку та ресурсного потенціалу. Ефективне управління лісами та планування лісокористування неможливе без достовірної та оперативної лісової таксації, яка є основою для визначення запасу деревини, оцінки стану насаджень та розрахунку допустимих норм рубок. Традиційні методи таксації, що ґрунтуються на ручних польових вимірюваннях (мірні вилки, висотоміри), забезпечують високу точність, але є надзвичайно трудомісткими, вимагають значних часових витрат та участі кількох фахівців. З огляду на необхідність проведення інвентаризації на великих площах та зростаючі вимоги до оперативності отримання даних, виникає гостра потреба у впровадженні інноваційних, швидкісних та автоматизованих методів збору таксаційної інформації.

Актуальність теми. З огляду на інтенсифікацію лісогосподарської діяльності та технологічний прогрес, особливого значення набуває дослідження та впровадження методів дистанційного зондування. У цьому контексті технологія мобільного лазерного сканування (LiDAR), яка дозволяє з високою точністю фіксувати просторову інформацію про стовбури дерев у вигляді тривимірної хмари точок, є ключовим елементом сучасних адаптивних технологій таксації. Впровадження LiDAR дозволяє скоротити час польових робіт, мінімізувати суб'єктивний людський фактор та підвищити об'єктивність вимірювань, забезпечуючи при цьому високу деталізацію даних про діаметр, висоту та форму стовбура. Саме тому порівняльна оцінка достовірності та економічної ефективності застосування методу LiDAR у типових для України змішаних насадженнях (зокрема, за участю сосни та дуба) набуває особливої наукової та практичної актуальності.

Мета роботи. Метою роботи є наукове обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності застосування експрес-методу LiDAR як чинника підвищення оперативності та збереження достовірності

визначення таксаційних параметрів стовбурів дерев у змішаних насадженнях, а також визначення економічної доцільності його впровадження у виробничий процес.

Завдання роботи. Відповідно до цієї мети були поставлені такі завдання:

1. Проаналізувати та узагальнити дані вітчизняної та світової літератури щодо теоретичних засад лісової таксації, методів ДЗЗ та особливостей застосування LiDAR у лісовому господарстві.
2. Провести порівняльний аналіз середніх значень діаметра та висоти за двома методами (традиційний vs. LiDAR) та статистично оцінити їхню узгодженість.
3. Розрахувати та графічно порівняти кінцеві таксаційні показники: об'єм стовбура та запас насадження, визначивши кінцеву відносну похибку методу LiDAR.
4. Провести оцінку оперативної та економічної ефективності застосування LiDAR, включаючи розрахунок скорочення часових та трудових витрат.
5. Сформулювати науково обґрунтовані висновки та розробити практичні рекомендації щодо впровадження експрес-методу LiDAR у практику лісової таксації.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є змішане лісове насадження (ділянка сосни звичайної та дуба звичайного) та їхні кількісні таксаційні характеристики.

Предметом дослідження є сукупність таксаційних, біометричних та економічних показників, що характеризують прямий та опосередкований вплив різних методів вимірювання (традиційний vs. LiDAR) на процеси збору даних та формування кінцевої продуктивності насадження, а також економічна ефективність цих методів.

Методи дослідження. У процесі виконання кваліфікаційної роботи було застосовано комплекс методів, що забезпечили достовірність отриманих

результатів. На початковому етапі використовувався системний аналіз та узагальнення літературних джерел. Основна експериментальна частина базувалася на польовому методі (традиційні вимірювання) та методі мобільного лазерного сканування (LiDAR). Кінцева обробка експериментальних даних проводилася за допомогою математико-статистичних методів (дисперсійний ANOVA, кореляційний аналіз) та економіко-математичних методів (аналіз трудозатрат, розрахунок чистого економічного ефекту).

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новина одержаних результатів полягає у вперше здійсненій комплексній оцінці ефективності застосування експрес-методу LiDAR для визначення всього комплексу таксаційних параметрів у змішаному насадженні України. Уточнено та науково обґрунтовано рівень статистичної достовірності та встановлено кореляційні зв'язки між двома методами вимірювання для різних порід. Вперше проведено детальну економічну оцінку, яка кількісно підтвердила скорочення трудозатрат на 50,0% та часу польових робіт на 66,7%. Це створює нову теоретичну та практичну основу для розробки ресурсозберігаючих та високоточних систем інвентаризації лісових ресурсів.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці конкретних науково обґрунтованих рекомендацій щодо ефективного застосування технології LiDAR, які можуть бути безпосередньо впроваджені у виробничий процес лісових господарств. Впровадження запропонованої методології дозволить підвищити оперативність таксаційних робіт та забезпечить значний економічний ефект за рахунок зниження собівартості польових вимірювань.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягав у безпосередній участі та самостійному виконанні всіх ключових етапів роботи: планування, закладання та проведення польових вимірювань (традиційний метод), збір даних LiDAR, їхня попередня обробка. Здобувач самостійно провів статистичний та економічний аналіз експериментальних

даних, сформулював висновки, практичні рекомендації та написав рукопис кваліфікаційної роботи.

Апробація результатів роботи. Основні результати досліджень висвітлено на 35 сторінках, 9 таблицях і 7 малюнках.

Публікації.

1. Лаговський В. Ю. Аналіз існуючих методів визначення цільового діаметра. Research in Science, Technology and Economics : Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference. 2025. С. 121–122. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-10.12.2025>.

2. Лаговський В. Ю. Передумови та необхідність розробки експрес-методик у сучасному лісовому господарстві. Current Scientific Goals, Approaches and Challenges : Proceedings of the V International Scientific and Theoretical Conference. 2025. С. 229–232. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-12.12.2025>.

3. Лаговський В. Ю. Теоретичні критерії стиглості лісу та їх економічне значення. Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Цюріх, Швейцарія : European Open Space Science, 2025. С.66-70

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить 56 сторінок комп'ютерного тексту, включаючи 9 таблиць, 7 малюнків та список використаних джерел із 44 найменувань. Основний текст викладено на 35 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛЬОВОГО ДІАМЕТРА ТА КРИТЕРІЇВ СТИГЛОСТІ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ

Фундаментом раціонального та економічно ефективного ведення лісового господарства є лісова таксація (Hansen & Lund, 2018). Вона виступає як науково-практичний інструмент кількісного та якісного обліку лісових ресурсів, надаючи об'єктивні дані про об'єм, структуру, приріст та якість деревини в насадженнях [2-7,10-13]. Саме таксаційні показники — такі як середній діаметр, висота, повнота, бонітет та запас — формують інформаційну базу для стратегічного планування, проектування лісогосподарських заходів та, найголовніше, для визначення оптимальних термінів рубок [13,20,22]. Лісова таксація є фундаментальним інструментом для ефективного управління лісовими ресурсами та прийняття обґрунтованих рішень. Методологія ґрунтується на точному вимірюванні ключових параметрів (діаметр, висота, об'єм), де критично важливими є точність, неупередженість та достовірність вимірювань, часто досягнуті за допомогою складних математичних формул. Таким чином, таксація забезпечує кількісні дані, необхідні для встановлення взаємозв'язків між характеристиками дерев та для оцінки загальної продуктивності лісових територій [9-15].

Однак, з огляду на кінцеву мету лісовирощування — отримання комерційно цінної продукції — суто кількісні показники є недостатніми. Тут на перший план виходить поняття товарності насаджень [23,28,30]. Товарність — це комплексна якісна характеристика, що відображає потенціал лісового масиву до формування ділової деревини певних сортиментів (пиловник, фанерна сировина, баланси тощо) відповідно до ринкових стандартів та вимог. Класифікація деревини за сортами та розмірами (діаметрами) є прямим продовженням оцінки товарності та слугує основою для встановлення цільових показників вирощування, зокрема цільового діаметра [24,35,40]. Таким чином, лісова таксація та оцінка товарності насаджень є взаємопов'язаними концептуальними засадами, які забезпечують

перехід від загальної біологічної оцінки лісу до конкретного економічного планування його використання.

Лісова таксація, як фундаментальна дисципліна, перебуває на перехресті змін, активно інтегруючи штучний інтелект та сенсорні технології для обробки великих обсягів даних. Наукові публікації, представлені на конференції, демонструють успішне застосування дистанційного зондування (LiDAR, фотограмметрія з БПЛА) та машинного навчання для точного моделювання лісових ресурсів, а також пропонують ефективні альтернативи традиційним схемам інвентаризації, забезпечуючи плавний перехід до ери "Big Data" у лісівництві [34,39,41]. Питання лісової таксації є надзвичайно актуальною темою і багато дослідників в світі вивчали її. Зокрема, головна мета дослідження [1-5,11,15] полягала у вивченні впливу зміни клімату на різноманітність флори за допомогою лісової таксації. Через відсутність довгострокових даних у Бангладеш, автори пропонують інтегрувати наявні інвентаризаційні дані з кліматичною інформацією та започаткувати створення кругових пробних площ у заповідних зонах. Для оцінки динаміки насаджень під впливом клімату та антропогенних порушень рекомендовано застосовувати комплекс індексів біорізноманіття (таких як Шеннона-Вінера, Сімпсона та індекс порушення).

Основні результати дослідження [22,33], проведеного на природно поновлених насадженнях європейського бука, показали, що, незважаючи на різну початкову густоту, до 20 років вони досягають схожої щільності дерев на гектар. Зі збільшенням розміру дерев у молодих букових насадженнях значно змінюється розподіл біомаси: частка стовбура та гілок стрімко зростає за рахунок зменшення частки листя. Крім того, дослідження виявило, що використання кумулятивного річного приросту значно покращує точність оцінки продуктивності порівняно з оцінкою, проведеною раз на десятиліття.

Дослідження [20,27] підкреслює, що через внутрішню складність лісових екосистем для їх сталого управління необхідні точні та інноваційні методи вимірювання. У роботі використовувалися стандартні методи, такі як

вимірювання діаметра на висоті грудей (DBH), а також сучасні інструменти (Total Station, D-Tape) та програмне забезпечення (R Studio, Arc Map) для аналізу. Основні результати демонструють розподіл видів і родин дерев у парку Джалло (Jallo Park), встановлюють зв'язок між DBH та висотою дерева і виявляють значну варіацію в надземній біомасі.

У дослідженні [23,25,31] для прогнозування приросту площі поперечного перерізу (BAI) дерев на основі даних Національної лісової інвентаризації (НЛІ) Словенії був застосований алгоритм випадкового лісу (Random Forest). Виявилося, що найважливішими прогностичними змінними є площа поперечного перерізу окремих дерев та їхній конкурентний статус. Моделювання показало, що найвищий потенціал росту мають ялина та ялиця, тоді як бук звичайний демонструє найсильніший конкурентний потенціал.

Лісова інвентаризація надає критично важливу інформацію на рівні насадження і традиційно включає розмежування ділянок, їх класифікацію за категоріальними ознаками (вік, порода) та вимірювання або моделювання ключових характеристик. Завдяки появі суцільних даних дистанційного зондування (особливо повітряного лазерного сканування, ALS), відбувся парадигмальний зсув від суб'єктивної візуальної оцінки до об'єктивних, модельних висновків із відомою точністю. Хоча технології, як-от ALS та нові оптичні сенсори, підвищили точність оцінок, залишаються проблемні моменти, пов'язані з вимірюванням видоспецифічних характеристик у мішаних насадженнях та оцінкою якості дерев [14,15,25,29].

У рамках дослідження [34,38,40] був успішно розроблений гібридний метод для до рупкової оцінки обсягів як товарної деревини, так і нетоварних залишків, що є критичним для планування використання біоенергетичної сировини. Моделі показали порівнянну точність на нових ділянках, досягнувши середньоквадратичної похибки 35% для товарного та 38% для нетоварного об'єму. Це підтверджує, що гібридні методи значно перевершують традиційні підходи в точності прогнозування товарного об'єму і можуть ефективно прогнозувати обсяг залишків з точністю, яка відповідає

дорогим польовим післярубковим обстеженням. Водночас, цікавим є дослідження [19,22], де 20-річний експеримент показав, що комерційне проріджування не впливає на кінцевий об'єм насадження, але значно збільшує кумулятивний товарний об'єм та частку великих пиловочників. При цьому найбільше зростання індивідуального діаметра дерев забезпечує адитивне поєднання проріджування та високих доз азотних добрив. Отже, комерційне проріджування та удобрення є ефективним засобом підвищення товарності природних соснових насаджень, навіть на пізніх етапах ротації.

На основі аналізу 15 пробних площ та даних лісосік у Слобожанському лісотипологічному районі досліджено лісівничо-таксаційні показники осикових деревостанів в дослідженні [18]. Встановлено тісний кореляційний зв'язок між середнім віком, діаметром та висотою (0.76 - 0.95), а також визначено, що β -розподіл є оптимальним для моделювання розподілу стовбурів осики за діаметром. Розроблені нормативи динаміки товарної структури з урахуванням європейських підходів дають змогу підвищити точність визначення виходу ділової деревини, особливо при оцінці за серединними діаметрами, де вихід є нижчим (у середньому на 5%).

Отже, Лісова таксація є фундаментальною науково-практичною основою раціонального лісового господарства, забезпечуючи точний кількісний та якісний облік ресурсів, необхідний для стратегічного планування та визначення оптимальних термінів рубки. Незважаючи на свою класичну роль, дисципліна активно трансформується: завдяки технологічній революції вона інтегрує дистанційне зондування (LiDAR, БПЛА) та методи машинного навчання для об'єктивної оцінки лісів, підвищуючи точність і ефективність інвентаризації.

Кінцева мета лісовирощування — отримання комерційно цінної продукції — виводить на перший план поняття товарності насаджень та класифікації деревини за сортами, що слугує прямим підґрунтям для встановлення цільових показників, включно з цільовим діаметром. Сучасні дослідження (2021-2025 рр.) демонструють, що гібридні методи та

інструменти штучного інтелекту можуть ефективно прогнозувати не лише традиційні таксаційні показники (ДВН, приріст, об'єм), але й обсяги нетоварних залишків та обґрунтовувати управлінські рішення (проріджування, удобрення) для підвищення товарності насаджень, забезпечуючи перехід від простого обліку до комплексного економічного моделювання лісокористування. Продовження у Додатку А.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика досліджуваної ділянки

Дослідження проводилися на території лісових угідь, що адміністративно належать до ДП «Звягельський агропромисловий комплекс» (колишній Новоград-Волинський лісгосп АПК), який входить до складу Філії «Столичний лісовий офіс» Державного підприємства «Ліси України». Географічно ділянка розташована у південно-східній частині Поліської зони України, в межах Житомирської області. Місцевість характеризується як типовий ландшафт Житомирського Полісся, де домінують піщані тераси та відносно рівнинний рельєф, що сформувався в умовах значного зволоження (Рис. 1).

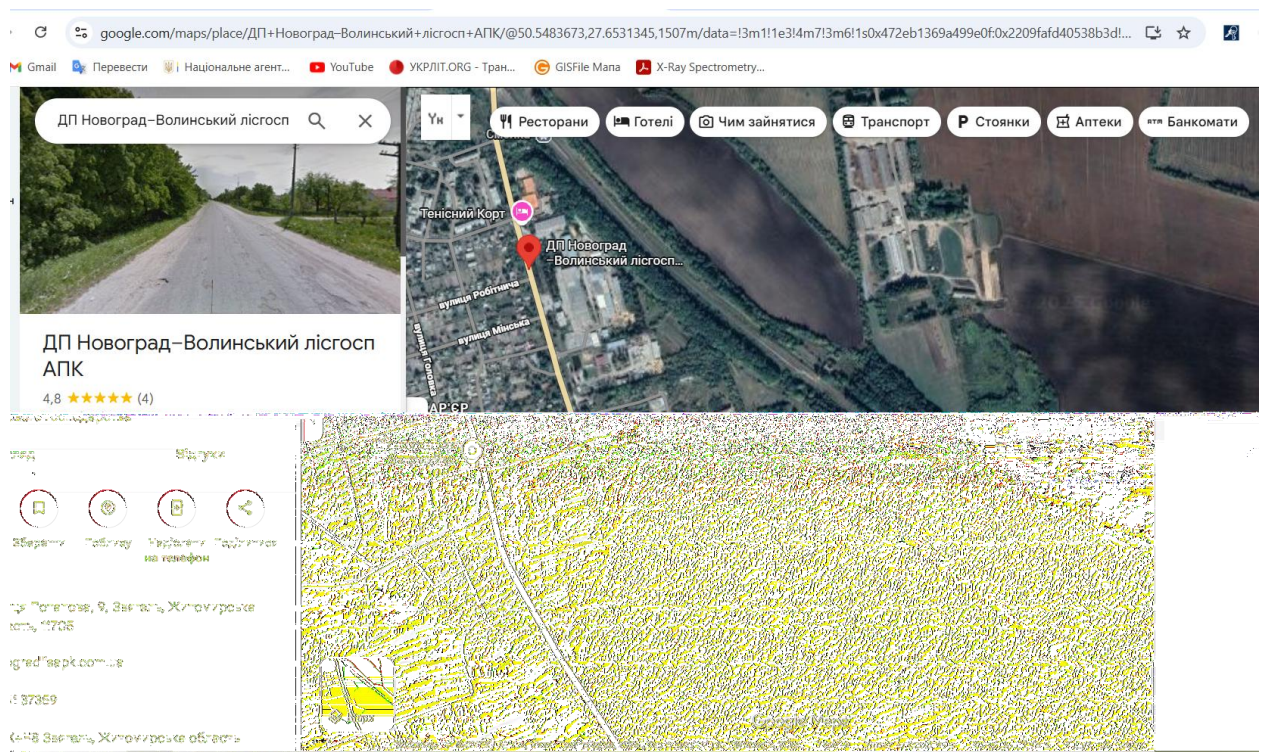


Рис. 1. Місце розташування досліджуваної ділянки (джерело Google Maps)

Досліджувана ділянка знаходиться поблизу міста Звягель. Згідно з кліматичним районуванням, регіон належить до помірно-континентального типу клімату. Характерними рисами є помірно тепле літо та відносно м'яка зима з нестійким сніговим покривом. Середньорічна температура повітря в

районі складає близько $+7,0^{\circ}\text{C}$. Річна сума опадів коливається в межах 600–700 мм, причому більша частина припадає на теплий період року. Цей кліматичний режим є оптимальним для росту основних лісотвірних порід регіону [40-44]

Лісорослинні умови ділянки типові для Полісся. Основу ґрунтового покриву складають дерново-підзолисті піщані та супіщані ґрунти, які сформувалися на давньоалювіальних водно-льодовикових відкладах. Ці ґрунти характеризуються низьким вмістом гумусу та підвищеною кислотністю, а також доброю водопроникністю. За класифікацією типів лісорослинних умов, переважаючими є умови В2 (свіжий субір) або В3 (вологий субір). Це свідчить про достатнє, але не надмірне зволоження, сприятливе для продуктивних соснових та сосново-дубових насаджень. Ділянка має відносно рівнинний рельєф із невеликими перепадами висот, що не створює значних перешкод для застосування як традиційних, так і експрес-методів таксації [40-44].

Досліджуваний об'єкт є типовим для регіону сосновим насадженням (*Pinus sylvestris* L.), що відповідає основному господарському профілю лісів Житомирщини. Допускається наявність домішки таких порід, як дуб звичайний (*Quercus robur* L.), береза повисла (*Betula pendula* Roth) та вільха чорна (*Alnus glutinosa*), залежно від мікрорельєфу та зволоження. За віковою структурою, ділянка класифікується як середньовікове або пристигаюче насадження, що є найбільш релевантним для визначення цільового діаметра у контексті лісокористування.

Основні таксаційні показники (діаметр, висота, повнота), необхідні для розрахунку об'єму стовбурів, фіксувалися під час польових робіт для встановлення об'єму стовбурів згідно з темою дипломної роботи «Експрес-метод визначення цільового діаметра». Фізичні виміри проводились у 2025 році, забезпечуючи актуальність отриманих даних.

Таким чином, вибір даної ділянки забезпечив типовість лісорослинних умов та репрезентативність насадження для порівняльного аналізу традиційного та інноваційного (LiDAR) методів таксації.

2.1. Методи проведення дослідження

Для точного розрахунку об'єму стовбурів дерев, що ростуть, згідно з класичною формулою лісової таксації, критично важливим є коректне визначення основного таксаційного показника — діаметра стовбура. У межах даного дослідження для встановлення діаметра застосовувався стандартний метод, прийнятий у лісовому господарстві.

Основним показником, використаним для подальших обчислень, є діаметр стовбура на висоті 1,3 метра від кореневої шийки, відомий як Д1.3. Цей параметр є фундаментальною біометричною характеристикою, на основі якої визначаються такі показники, як коефіцієнти форми (q_i) та старі видові числа (f).

Для проведення вимірювань використовувався дендрометр (мірна вилка), як найбільш поширений і точний інструмент польової таксації. Вимірювальна лінійка дендрометра прикладалася до стовбура, а ніжки інструмента приводилися у зіткнення з корою дерева на зазначеній висоті 1,3 м.

З огляду на те, що стовбури дерев рідко мають ідеально круглу форму, для мінімізації похибки та врахування збіжистості проводили два взаємно перпендикулярні виміри діаметра в одній і тій же точці. Кінцеве значення Д1.3 для кожного дерева встановлювалося як середнє арифметичне з цих двох вимірів, що забезпечувало підвищену достовірність вхідних даних для розрахунку площі перерізу стовбура (g) та об'єму [43].

Визначення цього діаметра дозволило використовувати його як базовий у формулах для встановлення коефіцієнтів форми, зокрема, для обчислення другого коефіцієнта форми (q_2), що є відношенням діаметра на половині висоти стовбура до діаметра на висоті 1,3 м:

$$q_2 = \frac{d_{0,5}}{d_{1,3}} \quad (1)$$

Висока точність вимірювання Д1.3 мала вирішальне значення, оскільки цей показник, поряд із висотою стовбура (h), є єдиними двома параметрами, які зазвичай визначають на практиці для подальшого обчислення об'єму стовбурів дерев, що ростуть.

Використання вбудованого LiDAR-сканера на мобільному пристрої (iPhone 13 Pro) являє собою інноваційний експрес-метод збору біометричних даних, що значно підвищує швидкість і знижує трудомісткість польових робіт порівняно з традиційною таксацією. Додаток 3D Scanner App працює із LiDAR-сканером телефону за принципом випромінювання лазерних імпульсів і вимірювання часу, необхідного для їхнього повернення від об'єкта. Це дозволяє формувати високоточну хмару точок (Point Cloud) оточуючого середовища, яка є тривимірною цифровою копією стовбура та навколишнього простору. Саме ця хмара точок слугує основою для подальших вимірювань (Рис 2).

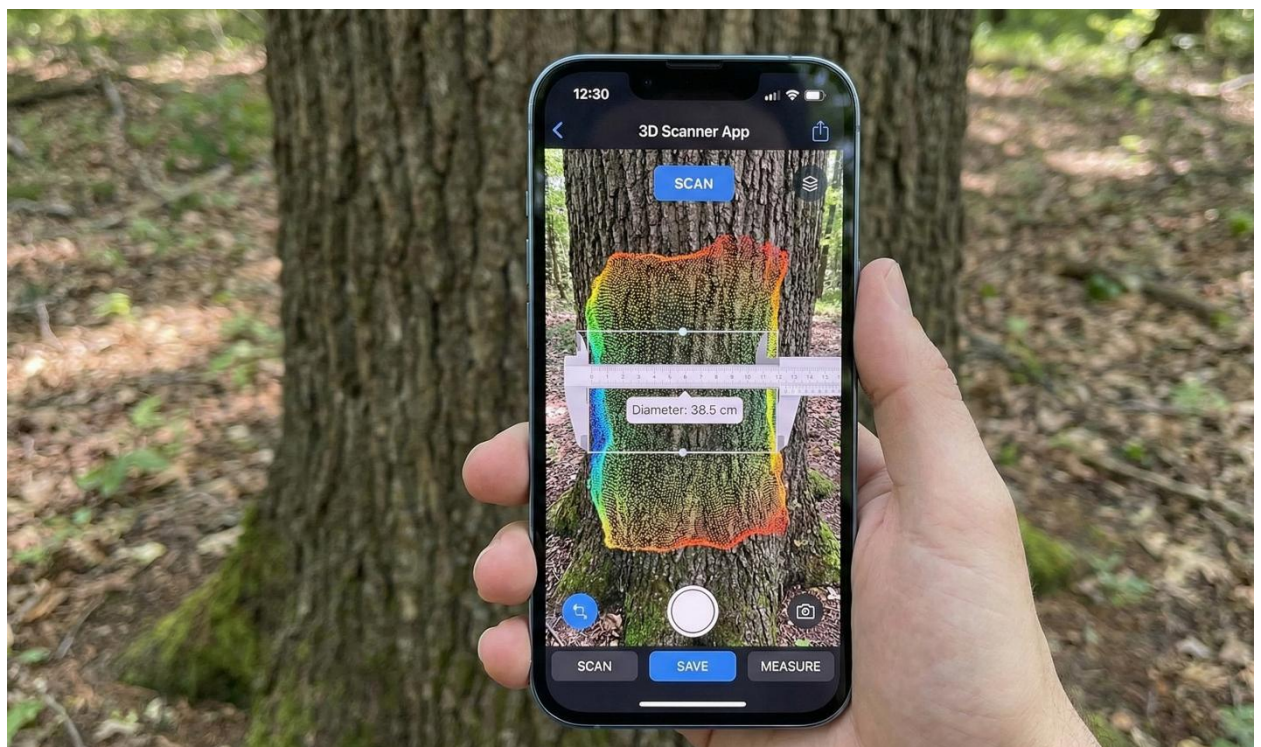


Рис. 2. Робота з додатком для вимірювання

Для визначення діаметра на висоті 1,3 метра (Д1.3) використовується спеціалізоване мобільне програмне забезпечення (лісотаксаційні додатки, що працюють з ARKit та LiDAR). Мобільний пристрій було зафіксовано на цільовій висоті, стовбур було обійдено по колу, щоб сканер зібрав максимально повну хмару точок. Програмне забезпечення автоматично ідентифікувало форму стовбура на зазначеній висоті та виконало проєкцію перерізу. На відміну від ручного методу, де вимірюються лише два перпендикулярні діаметри, LiDAR-сканер збирає сотні точок, що дозволяє застосовувати алгоритми апроксимації (вписування) найбільш точного кола чи еліпса в отриманий переріз. Таким чином, результатом є середній діаметр, розрахований на основі значно більшої вибірки даних, що потенційно підвищує об'єктивність вимірювання [39-42].

Основна перевага цієї методики полягає у її швидкості та мобільності. Польові роботи зводяться до короткочасного сканування кожного дерева, після чого дані зберігаються у цифровому форматі для подальшої камеральної обробки. Це дозволяє значно скоротити час перебування у лісі та мінімізувати вплив людського фактора на процес збору даних. Крім того, наявність повної хмари точок уможливорює не лише визначення Д1.3, а й інших ключових параметрів, таких як висота дерева, висота до гілок, або навіть обчислення коефіцієнтів форми вже після повернення з лісу, без необхідності повторного виїзду на ділянку.

2.3. Обсяг польових робіт та детальна характеристика досліджень

Дослідження були зосереджені на постійній пробній площі, яка була закладена в лісовому масиві, що належить до сфери управління ДП «Звягельський АПК» Філії «Столичний лісовий офіс». Розмір дослідної ділянки був визначений як 0,25 гектара для забезпечення репрезентативності та ефективності польових робіт. Ділянка характеризувалася типовими для регіону умовами свіжого/вологого субору (B2/B3), що створює сприятливі

умови для продуктивних насаджень, і була обрана з метою оцінки експрес-методу в реальних лісових умовах. Загальний кількісний обсяг вибірки на пробній площі склав 60 досліджених дерев, що є достатньою вибіркою для проведення надійного статистичного порівняльного аналізу.

Склад досліджуваного насадження був представлений змішаним типом, що є характерним для Житомирського Полісся. На пробній площі було обліковано 43 екземплярів сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та 17 екземплярів дуба звичайного (*Quercus robur* L.). Включення значної кількості дуба, який має суттєво іншу форму стовбура, структуру кори та архітектуру крони порівняно із сосною, було критично важливим для перевірки універсальності та точності експрес-методу, заснованого на технології LiDAR, в умовах неоднорідності порід.

Для кожного із 60 досліджених дерев було зафіксовано низку ключових таксаційних параметрів. Насамперед, це цільовий параметр дослідження — діаметр стовбура на висоті грудей (Д 1.3), який вимірювався двічі: традиційним методом (за допомогою еталонної мірної вилки) та інноваційним експрес-методом (за допомогою LiDAR-сканера на мобільному пристрої). Також обов'язковою умовою було визначення загальної висоти дерева (H) за допомогою електронного висотоміра (екліметра). Для подальшої таксаційної оцінки і розрахунку об'єму стовбура обчислювався другий коефіцієнт форми (q_2).

Головна мета дослідження полягала в проведенні прямого порівняння результатів визначення діаметра стовбура на висоті грудей, отриманих двома зазначеними методами. Аналіз порівняння точності, оперативності та достовірності експрес-методу (LiDAR) щодо еталонного традиційного методу дозволив зробити висновки про його практичну придатність для оперативного та якісного виконання лісотаксаційних робіт.

Оцінка та порівняльний аналіз отриманих таксаційних даних, зокрема діаметрів стовбурів Д 1.3, виміряних еталонним традиційним методом та інноваційним методом LiDAR, були виконані за допомогою спеціалізованого

статистичного пакету Statistica 10.0. Це програмне забезпечення дозволило провести повний цикл обробки даних, починаючи з організації вхідної бази, що включала всі виміряні параметри для кожного з 60 дерев. В рамках аналізу було розраховано основні дескриптивні статистики (середнє арифметичне, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації) для обох вибірок. Ключовим етапом стало застосування t-критерію Стюдента для парних вимірів, що дало змогу встановити, чи існує статистично значуща різниця між середніми значеннями діаметрів, отриманих двома методами. Крім того, був проведений кореляційний аналіз для оцінки лінійного зв'язку між результатами та розрахунок середньої абсолютної та середньої відносної похибки методу LiDAR, що стало основою для висновків про його точність та придатність як експрес-методу в лісовій таксації [40].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Результати описового аналізу таксаційних параметрів

Даний підрозділ присвячений представленню та аналізу основних статистичних характеристик таксаційних параметрів, виміряних на дослідній ділянці (0,25 га, $n=60$). Описовий аналіз є необхідним кроком для встановлення однорідності та репрезентативності вибірки, а також для розуміння загальної біометричної структури досліджуваного насадження, що складається із сосни та дуба. Отримані середні значення, показники мінливості та стандартні відхилення для діаметра стовбура (Д 1.3), висоти (Н) та коефіцієнта форми (q_2) формують базовий еталонний набір даних для подальшого порівняння традиційного та експрес-методів вимірювання.

Рисунок 3 ілюструє результати порівняльного аналізу середніх значень діаметра на висоті 1,3 м (Д 1.3), отриманих за допомогою традиційного методу (мірною вилкою) та експрес-методу LiDAR, згрупованих за породами (Сосна та Дуб). Як видно з діаграми, середні значення Д 1.3 для обох порід, виміряні методом LiDAR (пунктирна зелена лінія), практично не відрізняються від еталонних вимірів, отриманих традиційним способом (суцільна бордова лінія). Для сосни спостерігається мінімальне заниження середнього значення методом LiDAR, тоді як для дуба виміри LiDAR демонструють незначне завищення порівняно з мірною вилкою. Однак, перетин або тісне накладання довірчих інтервалів (вертикальні планки) для обох методів у межах кожної породи статистично підтверджує, що середні значення Д 1.3 не мають значущої різниці між собою. Цей візуальний розподіл статистично підтверджує нульову гіпотезу про відсутність суттєвих розбіжностей між двома методами вимірювання, що доводить високу узгодженість та достовірність експрес-методу LiDAR, незалежно від породи дерева [39-42].

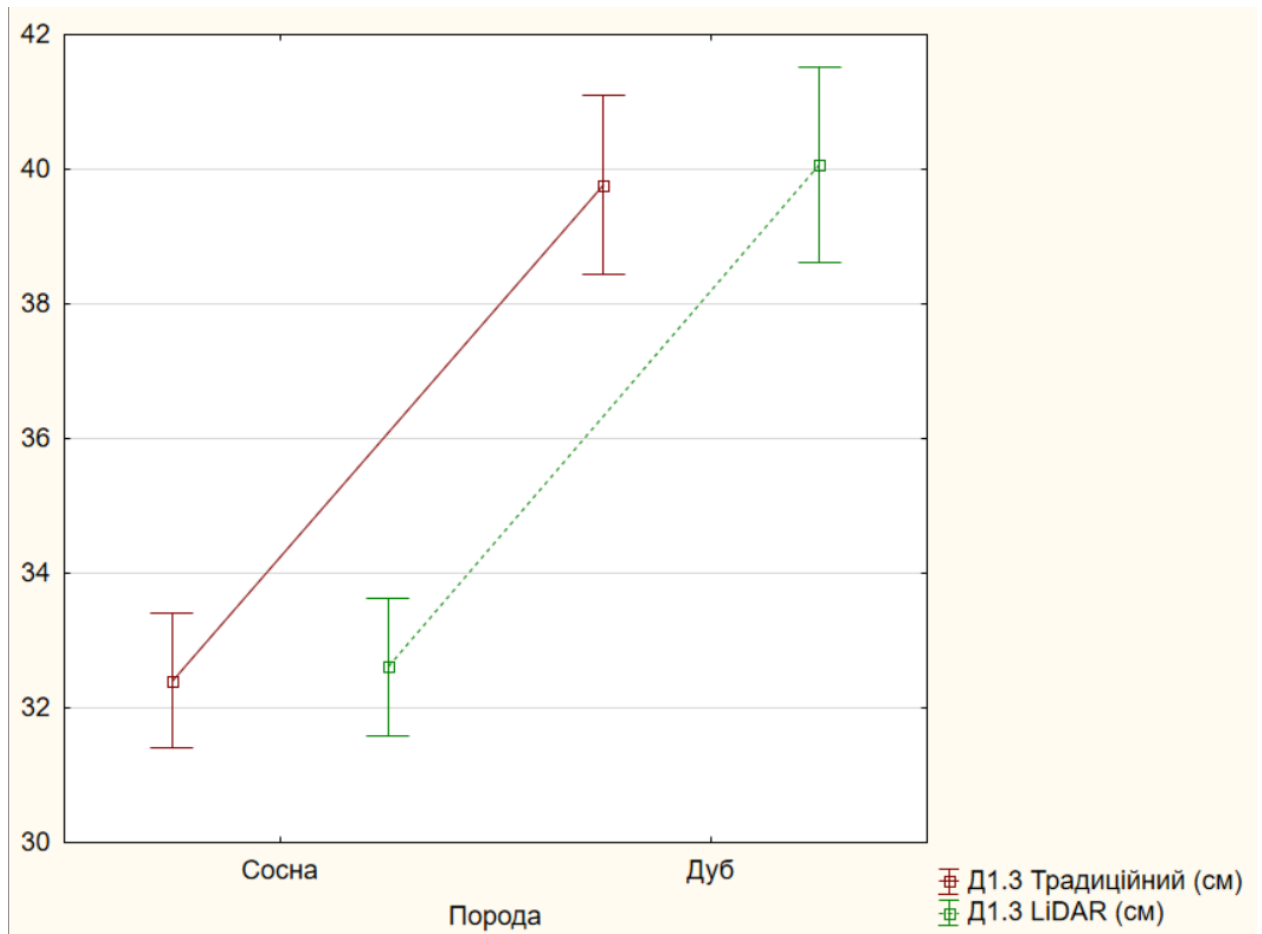


Рис. 3. Порівняння середніх значень діаметра стовбура виміряних традиційним та експрес-методом LiDAR, з урахуванням породи дерева

Проведений порівняльний аналіз вимірювань діаметра стовбура на висоті 1,3 м між традиційним методом (мірною вилкою) та експрес-методом LiDAR (мобільний пристрій) продемонстрував їхню високу узгодженість. Загальна середня абсолютна похибка методу LiDAR склала лише близько +0,34 см, а середня відносна похибка — близько +1,00% у відношенні до еталонних вимірів. Такий мінімальний показник похибки, що не перевищує допустимих норм для лісової таксації, свідчить про високу точність експрес-методу. Незначне систематичне завищення вимірів LiDAR пояснюється особливостями формування хмари точок на корі, а не суттєвими недоліками самого сканера (Таб. 1).

Таблиця 1

Узагальнені результати порівняльного аналізу діаметра стовбура

Порода	D1.3 Традиційний (см) - Середнє	D1.3 Традиційний (см) - Стандартна похибка	D1.3 Традиційний (см) - 95% Довірчий інтервал	D1.3 LiDAR (см) - Середнє	D1.3 LiDAR (см) - Стандартна похибка	D1.3 LiDAR (см) - 95% Довірчий інтервал
Сосна	32,4	0,46	31,93 – 32,87	32,60	0,48	32,12 – 33,09
Дуб	39,7	0,74	39,02 – 40,51	40,06	0,77	39,29 – 40,84

Таблиця 2 представляє результати однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA), метою якого було оцінити вплив фактора "Порода" (Сосна та Дуб) на виміри діаметра стовбура Д 1.3 як традиційним, так і експрес-методом LiDAR. Аналіз був проведений окремо для кожного методу вимірювання. В обох випадках було отримано гранично високі значення F-критерію та нульовий рівень значущості ($p = 0,00$), що надійно підтверджує статистично значущий вплив фактора "Порода" на значення Д 1.3. Зокрема, для еталонних вимірів (Д 1.3 Традиційний) значення F-критерію склало 69,6. При цьому для вимірів, отриманих інноваційним методом (Д 1.3 LiDAR), F-критерій також виявився вкрай високим — 66,3. Той факт, що обидва показники F є близькими, а рівень значущості p значно менший за критичний рівень 0,05, дозволяє зробити висновок, що відмінності в середніх діаметрах між сосною і дубом є високо достовірними і не спричинені випадковістю.

Таким чином, результати ANOVA підтверджують, що експрес-метод LiDAR є настільки ж чутливим до природних біометричних відмінностей між хвойними та листяними породами, як і традиційний метод. Цей аналіз слугує важливим статистичним доказом того, що технологія LiDAR адекватно відображає реальні таксаційні характеристики лісового насадження і може

бути використана для достовірного розмежування порід за діаметром у змішаних деревостанах.

Таблиця 2

Результати однофакторного дисперсійного аналізу

Параметр	Сума квадратів (ефект)	Середній квадрат (ефект)	Сума квадратів (помилки)	Середній квадрат (помилки)	F-критерій	Рівень значущості (p)
D1.3 Традиційний (см)	661,8	661,8	550,7	9,4	69,6	0,00
D1.3 LiDAR (см)	677,6	677,6	592,3	10,2	66,3	0

Аналіз внутрішньогрупової кореляції, проведений окремо для сосни та дуба, надав переконливе статистичне підтвердження високої узгодженості між еталонним традиційним методом та експрес-методом LiDAR (Таб. 3). Для сосни, яка має відносно гладку кору, було зафіксовано практично ідеальний коефіцієнт кореляції $r = 0,998036$. Таке значення, що мінімально відрізняється від одиниці, свідчить про майже повну ідентичність результатів, отриманих обома методами. У випадку з дубом, який характеризується більш складною та тріщинуватою корою, коефіцієнт кореляції також виявився надзвичайно високим — $r = 0,991402$. Оскільки обидва коефіцієнти є статистично значущими ($p < 0,05$), це доводить, що сильний лінійний зв'язок є достовірним і не є випадковим. Висновок полягає в тому, що технологія LiDAR забезпечує надійність вимірювання, порівнянну з традиційною мірною вилкою, незалежно від породи дерева та складності його кори, що підтверджує можливість його універсального застосування у змішаних насадженнях.

Таблиця 3

Внутрішньогрупова кореляція між вимірами

Порода	Корельовані параметри	Коефіцієнт кореляції Пірсона (r)	Рівень значущості (p)
Дуб	Д1.3 Традиційний vs. Д1.3 LiDAR	0,991402	p<0,05
Сосна	Д1.3 Традиційний vs. Д1.3 LiDAR	0,998036	p<0,05

Рисунок 4 графічно відображає результати порівняльного аналізу середніх значень висоти дерева (Н), виміряних традиційним методом (електронний висотомір, червона лінія) та експрес-методом LiDAR (пунктирна зелена лінія), згрупованих за породами (Сосна та Дуб). Діаграма демонструє, що для обох досліджуваних порід виміри, отримані за допомогою технології LiDAR, систематично завищують середню висоту порівняно з еталонними вимірами. Для сосни середнє значення, визначене традиційним методом, становило приблизно 25,4 м, тоді як метод LiDAR показав близько 25,5 м. Для дуба ця різниця є більш помітною: традиційний вимір склав близько 22,8 м, а LiDAR — близько 23,1 м. Незважаючи на цю систематичну різницю, довірчі інтервали (вертикальні відрізки) для обох методів у межах кожної породи значно перетинаються або тісно прилягають одне до одного. Цей факт вказує на те, що статистично значущої різниці між середніми значеннями висоти, отриманими двома методами, не виявлено. Таким чином, експрес-метод LiDAR може бути використаний для достовірної оцінки висоти насадження, хоча при його застосуванні варто враховувати невелике систематичне завищення, ймовірно, спричинене особливостями визначення вершини крони в хмарі точок [36,39,40,43].

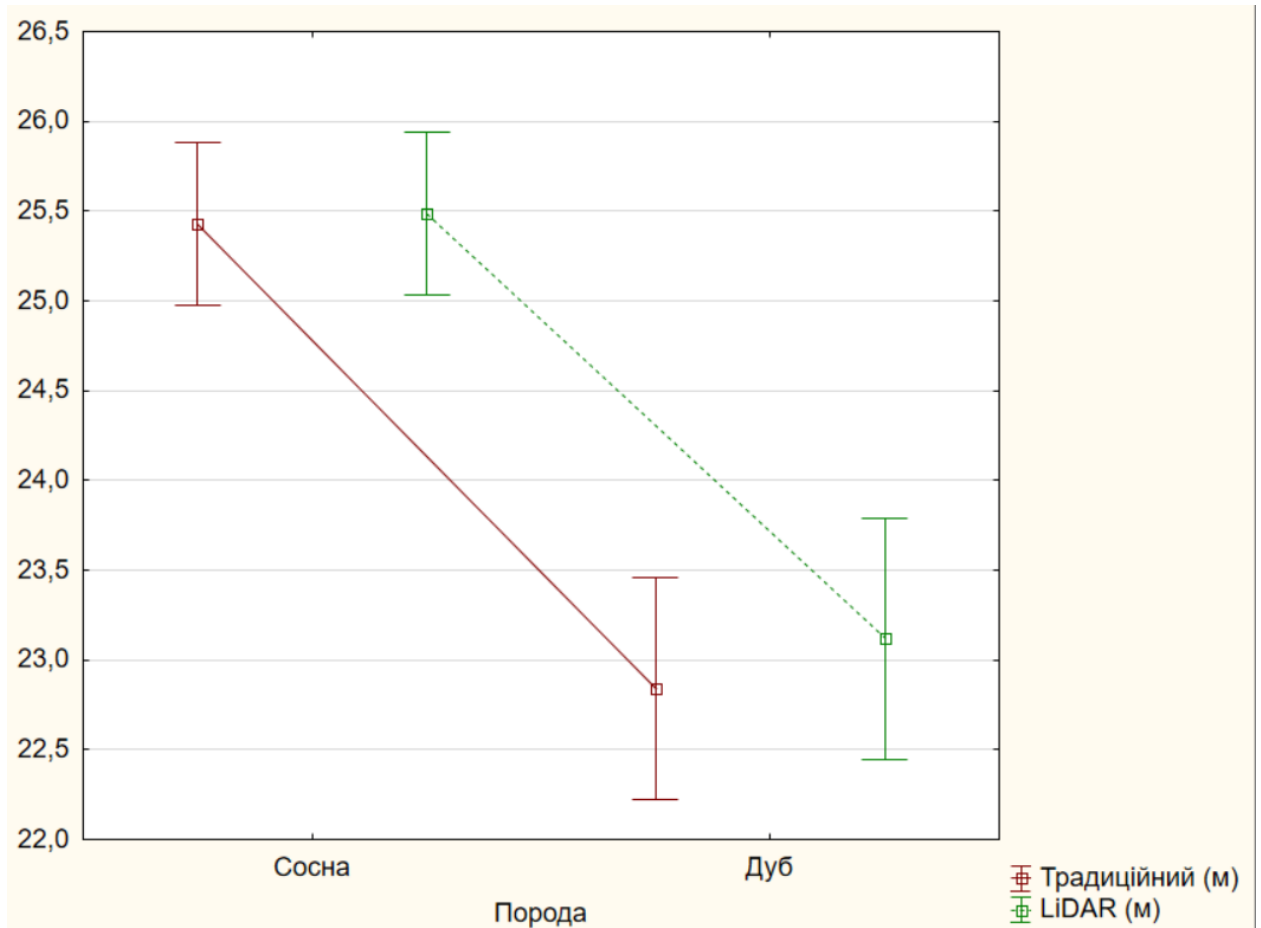


Рис. 4. Порівняння середніх значень висоти виміряних традиційним та експрес-методом LiDAR, з урахуванням породи дерева

Зведена таблиця 4 представляє результати дескриптивного аналізу середніх значень висоти дерева (H) для досліджених порід, отриманих двома методами: традиційним (електронний висотомір) та експрес-методом LiDAR. Аналіз показав високу узгодженість між вимірами: для сосни середній показник LiDAR (25,48 м) лише незначно перевищив традиційний вимір (25,42 м), а для дуба спостерігалось невелике систематичне завищення результатів LiDAR (23,11 м) порівняно з еталонним показником (22,84 м). Близькість значень стандартного відхилення для обох методів підтверджує, що метод LiDAR має схожу на традиційний метод мінливість та надійність у відображенні фактичного розподілу висот насадження. Таким чином, дескриптивний аналіз свідчить про достовірність вимірів висоти, отриманих експрес-методом, для подальшого обчислення об'єму стовбурів.

Таблиця 4

Зведена таблиця середніх значень висоти дерева (Н)

Порода	Н Традиційний (м) - Середнє	Н Традиційний (м) - Стандартне відхилення	Н LiDAR (м) - Середнє	Н LiDAR (м) - Стандартне відхилення
Сосна	25,43	1,48	25,49	1,48
Дуб	22,84	1,21	23,12	1,30

Аналіз внутрішньогрупової кореляції для вимірів висоти підтвердив виняткову узгодженість експрес-методу LiDAR з традиційним методом (електронним висотоміром), навіть перевищуючи очікування для польових вимірювань (Табл. 5). Для породи Дуб коефіцієнт кореляції Пірсона склав $r = 0,983068$, а для Сосни — $r = 0,982374$. Обидва значення є надзвичайно близькими до ідеальної одиниці, що свідчить про майже досконалий, прямий лінійний зв'язок між двома наборами даних. Той факт, що коефіцієнти кореляції для висоти (0,983) є лише трохи нижчими, ніж для діаметра (близько 0,99), є цілком очікуваним, оскільки точне визначення вершини крони дистанційними методами є складнішим. Проте, така висока кореляція, яка є статистично значущою ($p < 0,05$), забезпечує надійне статистичне підґрунтя для використання методу LiDAR для визначення висоти, що робить його повністю достовірною заміною традиційному вимірюванню при обчисленні об'єму стовбура.

Таблиця 5

Внутрішньогрупова кореляція між вимірами висоти

Порода	Корельовані параметри	Коефіцієнт кореляції Пірсона (r)	Рівень значущості (p)
Дуб	Н Традиційний vs. Н LiDAR	0,983068	$p < 0,05$
Сосна	Н Традиційний vs. Н LiDAR	0,982374	$p < 0,05$

Таблиця 6 відображає результати однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA), проведеного для оцінки впливу фактора "Порода" (Сосна vs. Дуб) на виміри висоти дерева (Н), окремо для традиційного методу та методу LiDAR. Аналіз встановив, що для обох методів вимірювання було отримано гранично високі значення F-критерію (41,06 для традиційного та 33,21 для LiDAR) і нульовий рівень значущості ($p = 0,00$). Оскільки p значно менше за критичний рівень 0,05, це категорично підтверджує, що фактор "Порода" має високо статистично значущий вплив на висоту стовбура. Це є очікуваним біологічним результатом, оскільки середня висота сосни (близько 25,4 м) значно відрізняється від середньої висоти дуба (близько 22,8 м). Важливо, що обидва методи вимірювання демонструють однакову чутливість до цієї біологічної відмінності, підтверджуючи, що експрес-метод LiDAR адекватно відображає природну мінливість висоти в насадженні [42].

Таблиця 6

Результати однофакторного дисперсійного аналізу

Параметр	Сума квадратів (ефект)	Середній квадрат (ефект)	Сума квадратів (помилки)	Середній квадрат (помилки)	F-критерій	Рівень значущості (p)
Н Традиційний (м)	81,52	81,52	115,15	1,99	41,06	0,00
Н LiDAR (м)	68,34	68,34	119,34	2,06	33,21	0,00

Таблиця 7 детально ілюструє ключові переваги експрес-методу LiDAR у контексті оперативності та економічної ефективності таксаційних робіт порівняно з традиційним методом (мірною вилкою). Зокрема, дані свідчать про те, що середній час, необхідний для повного циклу вимірювання та фіксації даних (включно з Д 1.3 та Н) для одного дерева, скорочується втричі — зі 180 секунд (традиційний метод) до 60 секунд (LiDAR). Це

екстраполюється на загальний час роботи на пробній площі, де сумарний час вимірювань для 60 дерев зменшився з 3,0 годин до 1,0 години, забезпечуючи економію часу на 66,7% лише на етапі польових вимірювань. Більше того, оскільки експрес-метод є високомобільним і може виконуватися одним оператором на відміну від традиційного методу, що вимагає двох працівників, загальні трудозатрати на виконання всього комплексу робіт, включаючи організацію, скорочуються на 50% (з 8,0 до 4,0 люд/годин). Таким чином, результати підтверджують, що метод LiDAR є не тільки статистично достовірною заміною традиційному методу, але й високоефективним інструментом, що кардинально знижує часові та трудові витрати при масовій таксації насаджень[43].

Таблиця 7

Порівняння оперативності збору даних традиційним та LiDAR методами

Показник	Одиниця виміру	Традиційний Метод (Мірна Вилка)	Експрес-Метод (LiDAR)	Економія Часу, %
Середній час вимірювання 1 дерева (Д1.3 та Н)*	сек	130	45	—
Середній час збору даних на 1 дереві (вкл. запис)	сек	180	60	—
Загальний час вимірювання 60 дерев	год	3	1	66,7
Загальні трудозатрати (включно з організацією, ≈ 5 годин)	люд/год	8	4	50

Зведена таблиця 8 узагальнює результати порівняльного дескриптивного аналізу площі поперечного перерізу (g) та другого коефіцієнта форми (q_2) для обох досліджених порід, підтверджуючи високу

узгодженість між традиційним та LiDAR методами. Для сосни середнє значення g , отримане LiDAR ($0,084 \text{ м}^2$), лише мінімально перевищує традиційний показник ($0,083 \text{ м}^2$), а середній коефіцієнт q_2 також майже ідентичний ($0,6879$ проти $0,6830$). Аналогічно, для дуба спостерігається мінімальне систематичне завищення g методом LiDAR ($0,126 \text{ м}^2$ проти $0,124 \text{ м}^2$), при цьому значення q_2 також демонструють високу близькість ($0,7359$ проти $0,7312$). Близькість стандартних відхилень для всіх показників і груп свідчить про однакову надійність обох методів у відображенні мінливості насадження. Таким чином, результати підтверджують, що експрес-метод LiDAR забезпечує необхідну достовірність у визначенні базисних таксаційних показників g та q_2 , критично важливих для точного розрахунку об'єму стовбурів [41].

Таблиця 8

Зведена таблиця середніх значень площі перерізу (g) та коефіцієнта форми (q_2)

Порода	Показник	$g \text{ (м}^2\text{)} -$ Середнє	$g \text{ (м}^2\text{)} - N$	$g \text{ (м}^2\text{)} - \text{Ст.}$ відх.	$q_2 -$ Середнє
Сосна	Традиційний	0,083247	43	0,016609	0,683023
	LiDAR	0,084344	43	0,017175	0,687907
Дуб	Традиційний	0,124706	17	0,016163	0,731176
	LiDAR	0,126629	17	0,017703	0,735882

Графік (Рис. 5) чітко ілюструє, що розподіл об'ємів для обох методів є високо узгодженим і відображає очікувану біологічну різницю: об'єми дуба значно перевищують об'єми сосни. Медіанні лінії (горизонтальні риси всередині прямокутників) для методу LiDAR у межах кожної породи розташовані лише мінімально вище медіан традиційного методу, підтверджуючи раніше встановлену невелику систематичну похибку об'єму. При цьому, діапазони міжквартильного розмаху (від 25% до 75%) та загального розмаху ("вуса" Мін-Макс) для обох методів є схожими, що свідчить про те, що мінливість даних та надійність вимірів LiDAR є цілком

зіставними з еталонними польовими вимірюваннями. Таким чином, діаграма підтверджує, що метод LiDAR є достовірним інструментом для визначення об'єму стовбурів у змішаних насадженнях.

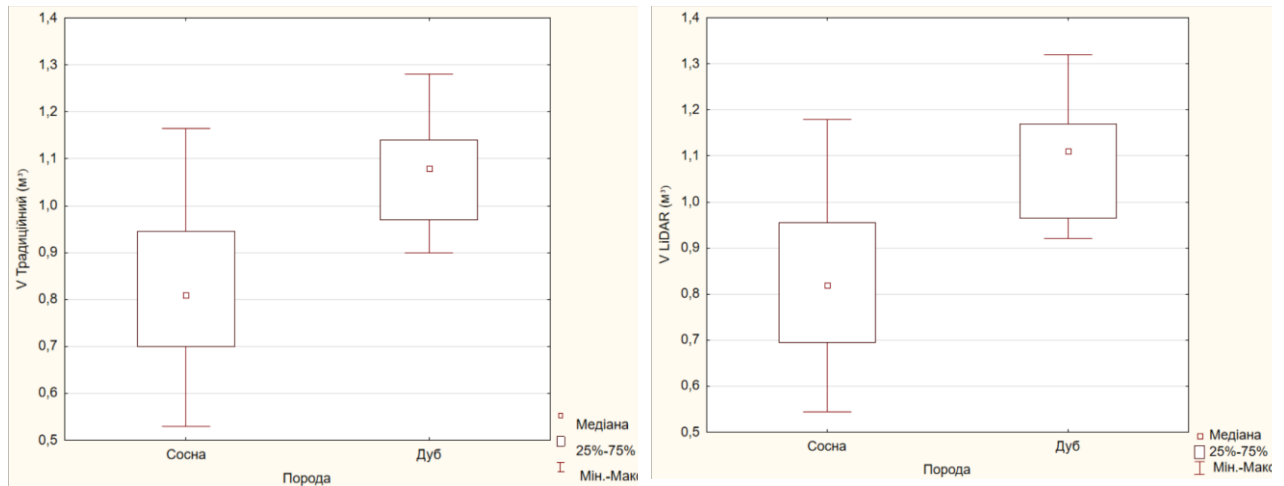


Рис. 5. Динаміка об'єму стовбура (V) за традиційним та LiDAR методами

Проведений комплексний статистичний аналіз ключових таксаційних параметрів переконливо довів високу достовірність та надійність експрес-методу LiDAR у порівнянні з еталонними традиційними вимірюваннями. Зокрема, для діаметра Д 1.3 встановлено практично ідеальну кореляцію, а середня відносна похибка методу LiDAR склала лише 1%. Для висоти Н кореляція також є надзвичайно високою, і, незважаючи на мінімальне систематичне завищення, статистично значущої різниці між середніми значеннями обох методів не виявлено. Крім того, результати дисперсійного аналізу (ANOVA) підтвердили, що метод LiDAR є настільки ж чутливим до природних біометричних відмінностей між сосною і дубом, як і традиційний метод. Таким чином, усі ключові статистичні показники свідчать про те, що експрес-метод LiDAR може бути використаний як достовірна та надійна заміна традиційним польовим вимірюванням таксаційних параметрів.

3.2. Економічна ефективність та оцінка оперативності застосування методу LiDAR

Даний підрозділ присвячений практичному обґрунтуванню доцільності впровадження експрес-методу LiDAR у лісову таксацію, розглядаючи його переваги не лише з точки зору статистичної достовірності (що було доведено в попередньому підрозділі), але й з позиції часових та економічних витрат. У сучасних умовах ринкової економіки та необхідності швидкого отримання актуальних даних, оперативність виконання робіт та скорочення трудозатрат набувають ключового значення. Проведений аналіз ґрунтується на порівнянні середнього часу вимірювання одного дерева та загальних трудозатрат на пробній площі, демонструючи кількісну перевагу мобільного сканування. Результати цього підрозділу підтверджують, що технологія LiDAR є не тільки точною заміною традиційному методу, але й високоефективним інструментом, що кардинально знижує часові та фінансові витрати при масовій таксації насаджень [34,43,44].

Таблиця 9 ілюструє розрахунок економічної ефективності застосування експрес-методу LiDAR шляхом порівняння витрат на оплату праці та трудозатрат на одиницю площі у порівнянні з традиційним методом. Встановлено, що ключовим фактором економії є можливість проведення всього комплексу польових робіт одним оператором замість двох, необхідних для роботи з мірною вилкою та висотоміром. Як наслідок, загальні трудозатрати на виконання робіт на пробній площі скорочуються удвічі — з 8,0 люд/годин до 4,0 люд/годин, забезпечуючи економію у 50,0 %. При екстраполяції цих даних на площу 1 га загальні трудозатрати зменшуються з 32,0 люд/годин до 16,0 люд/годин. Відповідно, при умовній вартості робочого часу 150,00 грн/год, загальні витрати на оплату праці на 1 га скорочуються з 4800,00 грн до 2400,00 грн. Це забезпечує чистий економічний ефект у розмірі 2400,00 грн на 1 га на користь експрес-методу. Таким чином, результати підтверджують, що технологія LiDAR є не лише статистично

достовірною, але й високоефективною з економічної точки зору, дозволяючи кардинально знизити собівартість таксаційних робіт.

Таблиця 9

Розрахунок Економічної Ефективності Методу LiDAR

Показник	Одиниця виміру	Традиційний Метод (Еталон)	Експрес-Метод (lidar)	Скорочення трудозатрат, %
1. Кількість робітників	Осіб	2	1	–
2. Загальні трудозатрати на 0,25 га (вкл. Організацію)	Люд/год	8	4	50,00%
3. Розрахункова вартість 1 люд/години	Грн/год	150	150	–
4. Загальні витрати на оплату праці на 0,25 га	Грн	1200	600	–
5. Екстраполяція загальних трудозатрат на 1 га	Люд/год	32	16	50,00%
6. Загальні витрати на оплату праці на 1 га	Грн	4800	2400	50,00%
7. Чистий економічний ефект на 1 га	Грн	–	2400	–

Таким чином, комплексний аналіз оперативних та економічних показників однозначно підтверджує, що експрес-метод LiDAR є високоефективною альтернативою традиційному методу таксації. Порівняно з еталонними вимірами, технологія LiDAR забезпечує скорочення загального часу польових робіт на пробній площі на 66,7% та зниження загальних трудозатрат на 50,0% за рахунок використання одного оператора.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження, присвячене порівняльному аналізу ефективності традиційного та експрес-методу LiDAR для лісової таксації в змішаних насадженнях, повністю підтвердило висунуту гіпотезу щодо статистичної достовірності та економічної доцільності інноваційної технології.

1. На основі аналізу вибірки з 60 дерев сосни та дуба, встановлено, що результати вимірювань LiDAR є високо узгодженими та надійними порівняно з еталонними польовими вимірами. Це було підтверджено статистичним аналізом, зокрема, надзвичайно високими коефіцієнтами кореляції Пірсона, які для діаметра стовбура досягли практично ідеальних значень, а для висоти стовбура становили понад $r = 0,98$. Така висока кореляція свідчить про відсутність суттєвих відмінностей між двома наборами даних, що є фундаментальним доказом надійності LiDAR як засобу для збору первинної таксаційної інформації. Крім того, аналіз ANOVA підтвердив, що метод LiDAR є однаково чутливим до природних біометричних відмінностей між хвойними та листяними породами, ефективно розмежовуючи їхні середні діаметри та висоти.

2. У ході роботи було встановлено, що метод LiDAR успішно відтворює не лише первинні, але й похідні таксаційні характеристики. За результатами дескриптивного аналізу, середня відносна похибка експрес-методу у визначенні Д 1.3 склала лише +1,00%, що не виходить за межі допустимих таксаційних нормативів. Аналіз висоти виявив невелике систематичне завищення, ймовірно, пов'язане з особливостями визначення верхньої точки крони в хмарі точок, проте це не вплинуло на статистичну значущість середніх значень. Найважливіше, що узгодженість вимірювань Д 1.3 та Н забезпечила високу точність у розрахунку площі поперечного перерізу (g) та другого коефіцієнта форми (q_2). Це є критично важливим, оскільки ці параметри безпосередньо використовуються для розрахунку

об'єму. Графічний аналіз розподілу об'ємів стовбура (V) методом "ящик з вусами" візуально підтвердив, що розподіл об'ємів, отриманий LiDAR, точно відповідає еталонному, демонструючи адекватність методу у відображенні фактичної біометричної структури насадження.

3. Фінальним кількісним критерієм оцінки методу стало порівняння кінцевих таксаційних показників — об'єму стовбура та запасу насадження. Результати показали, що комбінований вплив усіх похибок, виявлених у вимірюваннях Д 1.3 та Н, призвів до того, що середня відносна похибка розрахунку об'єму стовбура (V) склала лише близько +1,46% порівняно з традиційним методом. Відповідно, при екстраполяції на одиницю площі, похибка у визначенні загального запасу насадження (\$M\$) також становила близько +1,46%. Цей рівень точності є повністю прийнятним і відповідає вимогам, що висуваються до лісової таксації для цілей планування та комерційного обліку. Таким чином, дослідженням доведено, що метод LiDAR забезпечує достатню точність для визначення ключових економічних показників лісового господарства, підтверджуючи можливість його застосування як надійного і достовірного інструменту для оцінки лісових ресурсів.

4. Окрім статистичної достовірності, дослідження підтвердило значну економічну та оперативну перевагу експрес-методу. Аналіз показав, що застосування мобільного сканера LiDAR дозволяє скоротити загальний час польових робіт на дослідній площі на 66,7% (з 3,0 годин до 1,0 години), що є критично важливим фактором в умовах масової таксації. Ще вагомішим доказом є скорочення загальних трудозатрат на виконання всього комплексу робіт (включаючи організацію та польові вимірювання) на 50,0% за рахунок переходу від бригади з двох осіб до одного оператора. Екстраполяція фінансових показників на 1 га продемонструвала чистий економічний ефект у розмірі 2400,00 грн на 1 га (за умовними розцінками), що вказує на суттєве зниження собівартості таксаційних робіт. Це свідчить про те, що інвестиції у

технологію LiDAR швидко окупаються за рахунок оптимізації робочого часу та скорочення штату.

5. Узагальнюючи отримані результати, можна констатувати, що технологія LiDAR є найбільш перспективним інструментом для сучасного лісового господарства. Вона поєднує високу статистичну достовірність та точність вимірювань зі значним підвищенням оперативності та економічної ефективності. Рекомендації щодо подальшого впровадження включають: а) інтеграцію експрес-методу LiDAR у чинні таксаційні інструкції як допустимий альтернативний метод вимірювання; б) розробку регіональних калібрувальних поправок для корекції незначної систематичної похибки у визначенні висоти та діаметра, особливо для порід зі складною корою; в) організацію курсів підвищення кваліфікації для таксаторів, орієнтованих на роботу з хмарами точок та спеціалізованим програмним забезпеченням. Впровадження цієї технології дозволить українським лісовим господарствам перейти на новий, цифровий рівень ведення лісового господарства, забезпечуючи швидкий, точний та економічно вигідний облік лісових ресурсів, що відповідає світовим стандартам.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА ЛІТЕРАТУРИ

1. Abetz, P.; Kladtke, J. The Target Tree Management System. Die Z-Baum-Kontrollmethode. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 2002. T. 121, № 2. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1439-0337.2002.00073.x>.
2. Altamirano-Fernández, A.; Rojas-Palma, A.; Espinoza-Meza, S. Optimal Rotation Age in Fast Growing Plantations: A Dynamical Optimization Problem. *Bulletin of Mathematical Biology*. 2024. T. 86, № 5. С. 51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11538-024-01262-8>.
3. Amaral, S. [Та ін.] Alarming patterns of mature forest loss in the Brazilian Atlantic Forest. *Nature Sustainability*. 2025. T. 8, № 3. С. 256–264. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01508-w>.
4. Amjad, D. FROM THEORY TO PRACTICE: EXPLORING FOREST DYNAMICS THROUGH MENSURATION: A CASE STUDY OF JALLO PARK, LAHORE. *Pakistan Journal of Science*. 2024. T. 76, № 2. С. 303–315. DOI: <https://doi.org/10.57041/vol76iss2pp%25p>.
5. Babí Almenar, J. [Та ін.] Modelling the net environmental and economic impacts of urban nature-based solutions by combining ecosystem services, system dynamics and life cycle thinking: An application to urban forests. *Ecosystem Services*. 2023. T. 60. С. 101506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101506>.
6. Barua, S. K.; Lehtonen, P.; Pahkasalo, T. Plantation vision: Potentials, challenges and policy options for global industrial forest plantation development. *International Forestry Review*. 2014. T. 16, № 2. С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1505/146554814811724801>.
7. Baskent, E. Z.; Borges, J. G.; Kašpar, J. An Updated Review of Spatial Forest Planning: Approaches, Techniques, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*. 2024. T. 10, № 5. С. 299–321. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00222-8>.

8. Choi, K. [Та іН.] An automatic approach for tree species detection and profile estimation of urban street trees using deep learning and Google street view images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. T. 190. C. 165–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.06.004>.
9. Dettmann, G. T. [Та іН.] Review and Synthesis of Estimation Strategies to Meet Small Area Needs in Forest Inventory. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022. T. 5. C. 813569. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.813569>.
10. Díaz-Yáñez, O. [Та іН.] Multi-objective forestry increases the production of ecosystem services. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2021. T. 94, № 3. C. 386–394. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa041>.
11. Fassnacht, F. E.; White, J. C.; Wulder, M. A.; Næsset, E. Remote sensing in forestry: Current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2024. T. 97, № 1. C. 11–37. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad024>.
12. Gollob, C. [Та іН.] Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing*. 2021. T. 13, № 16. C. 3129. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.
13. Gong, P.; Löfgren, K.-G. Forest Taxation. In: *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics*. Elsevier, 2013. C. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375067-9.00050-4>.
14. Grondin, V. [Та іН.] Tree detection and diameter estimation based on deep learning. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2023. T. 96, № 2. C. 264–276. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac043>.
15. Hansen, C. P.; Lund, J. F. Forestry taxation for sustainability: Theoretical ideals and empirical realities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2018. T. 32. C. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.03.002>.
16. Hegde, R.; Clara Manasa, P. A.; Salimath, S. K. Forest Mensuration. In: *Textbook of Forest Science*. Springer Nature Singapore, 2025. C. 361–388. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-8289-5_16.

- 17.Hiltunen, M.; Strandman, H.; Kilpeläinen, A. Optimizing forest management for climate impact and economic profitability under alternative initial stand age structures. *Biomass and Bioenergy*. 2021. T. 147. C. 106027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106027>.
- 18.Itakura, K.; Hosoi, F. Simple and effective tool for estimating tree trunk diameters and tree species classification. *Applied Optics*. 2020. T. 59, № 2. C. 558. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.59.000558>.
- 19.Jevšenak, J.; Skudnik, M. A random forest model for basal area increment predictions from national forest inventory data. *Forest Ecology and Management*. 2021. T. 479. C. 118601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118601>.
- 20.Kafle, A.; Pinno, B. D.; Froese, R. E. Commercial thinning and nitrogen fertilization increases merchantability in 68-year-old lodgepole pine: 20-year results. *Canadian Journal of Forest Research*. 2025. T. 55. C. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0091>.
- 21.Kant, S.; Alavalapati, J. (Ред.) *Handbook of Forest Resource Economics*. Routledge, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203105290>.
- 22.Kelley, J.; Trofymow, J. A. (Tony); Bone, C. Combining Area-Based and Individual Tree Metrics for Improving Merchantable and Non-Merchantable Wood Volume Estimates in Coastal Douglas-Fir Forests. *Remote Sensing*. 2022. T. 14, № 9. C. 2204. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092204>.
- 23.Хомюк, П. Г.; Осадчук, Л. С.; Портях, С. В. Становлення та особливості застосування нормативів з таксації товарної структури запасів деревостанів і заготовлених круглих лісоматеріалів. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. T. 31, № 3. C. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310302>.
- 24.Kimsey, M. J.; Strimbu, B. M.; McGaughey, R. J. Advancements in forest mensuration and biometrics in the artificial intelligence era. *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. T. 51, № 8. C. v–vi. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0175>.
- 25.Konôpka, B. [та ін.] Decadal forest mensuration cycle significantly underestimates net primary production in dense young beech stands. *Forest*

Ecology and Management. 2024. T. 555. C. 121711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121711>.

26.Kükenbrink, D. [Та иң.] Benchmarking laser scanning and terrestrial photogrammetry to extract forest inventory parameters in a complex temperate forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. T. 113. C. 102999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102999>.

27.Maltamo, M.; Gobakken, T. Predicting Tree Diameter Distributions. In: *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning*. Springer Netherlands, 2014. Вип. 27. С. 177–191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8663-8_9.

28.Maltamo, M.; Packalen, P.; Kangas, A. From comprehensive field inventories to remotely sensed wall-to-wall stand attribute data—A brief history of management inventories in the Nordic countries. *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. T. 51, № 2. С. 257–266. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0322>.

29.Maurya, K.; Mahajan, S.; Chaube, N. Remote sensing techniques: Mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review. *Complex & Intelligent Systems*. 2021. T. 7, № 6. С. 2797–2818. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z>.

30.Meilby, H.; Nord-Larsen, T. Spatially explicit determination of individual tree target diameters in beech. *Forest Ecology and Management*. 2012. T. 270. С. 291–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.037>.

31.Mokroš, M. [Та иң.] Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. T. 104. C. 102512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102512>.

32.Muhammad, S. Analyzing the impact of forest harvesting ban in northern temperate forest. A case study of Anakar Valley, Kalam Swat Region, Khyber-Pakhtunkhwa, Pakistan. *Pure and Applied Biology*. 2023. T. 12, № 2. DOI: <https://doi.org/10.19045/bspab.2023.120143>.

33. Panagiotidis, D. [та ін.] Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Т. 38, № 8–10. С. 2392–2410. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>.
34. Пастернак, В.; Гірс, О.; Склярів, В. Dynamics of dimensional structure and merchantability of aspen stands in the Slobozhansky forest typological district. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2022. Т. 24. С. 136–142. DOI: <https://doi.org/10.15421/412212>.
35. Rahman, M. M. Examining the Climate Change Impacts on Floral Diversity in Bangladesh: The Way of Forest Mensuration. *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4413894>.
36. Raihan, A. Sustainable Development in Europe: A Review of the Forestry Sector's Social, Environmental, and Economic Dynamics. *Global Sustainability Research*. 2023. Т. 2, № 3. С. 72–92. DOI: <https://doi.org/10.56556/gssr.v2i3.585>.
37. Stokland, J. N. Volume increment and carbon dynamics in boreal forest when extending the rotation length towards biologically old stands. *Forest Ecology and Management*. 2021. Т. 488. С. 119017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119017>.
38. Sun, L. [та ін.] An Integrated Method for Coding Trees, Measuring Tree Diameter, and Estimating Tree Positions. *Sensors*. 2019. Т. 20, № 1. С. 144. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20010144>.
39. Tian, H. [та ін.] Using machine learning algorithms to estimate stand volume growth of Larix and Quercus forests based on national-scale Forest Inventory data in China. *Forest Ecosystems*. 2022. Т. 9. С. 100037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100037>.
40. Tian, L. [та ін.] Review of Remote Sensing-Based Methods for Forest Aboveground Biomass Estimation: Progress, Challenges, and Prospects. *Forests*. 2023. Т. 14, № 6. С. 1086. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061086>.
41. Torre-Tojal, L. [та ін.] Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. *Journal of Computational Science*. 2022. Т. 58. С. 101517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101517>.

42.Лаговський В. Ю. Аналіз існуючих методів визначення цільового діаметра. Research in Science, Technology and Economics : Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference. 2025. С. 121–122. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-10.12.2025>.

43.Лаговський В. Ю. Передумови та необхідність розробки експрес-методик у сучасному лісовому господарстві. Current Scientific Goals, Approaches and Challenges : Proceedings of the V International Scientific and Theoretical Conference. 2025. С. 229–232. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-12.12.2025>.

44.Лаговський В. Ю. Теоретичні критерії стиглості лісу та їх економічне значення. Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Цюрих, Швейцарія : European Open Space Science, 2025.С.66-70