e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

AN ALGORITHM FOR DETERMINING TREE DIAMETER AND HEIGHT FROM LASER SCANNING DATA

O. Herasymchuk*, O. Herhel

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
Laser scanning,
point cloud,
TreeLS,
stem cross-section,
curve fitting,
tree mensuration

Article history:
Received 17.09.2026
Reviewed 02.10.2026
Approved 30.10.2026

Corresponding author:*
alex_gop_ukr@ukr.net

ABSTRACT

This paper presents a workflow for determining the diameter and height of individual trees from laser scanning data using the TreeLS package in R. The study aims to structure the point cloud processing algorithm, explain the purpose of its parameters, and demonstrate its application to a single tree. The workflow includes data loading, height normalization relative to the ground surface, removal of points with negative heights, voxel-based downsampling for tree detection, stem location mapping, assignment of tree identifiers to points, and extraction of stem points. Diameter is determined by fitting a circle to a horizontal slice using iteratively reweighted least squares. The slice is located at a height of 1.3 m and has a thickness of 0.1 m; the voxel size used for stem mapping is 0.02 m. Code implementing the main operations and a procedure for checking cross-sectional geometry are provided. Tree height is estimated as the maximum normalized vertical coordinate of the points assigned to the tree. The paper explains why this calculation requires verification that the treetop belongs to the target tree and is fully retained during spatial selection. For tree No. 1, the estimated diameter and height were 36.5 cm and 28.54 m, compared with field measurements of 38.2 cm and 28.30 m, respectively. The differences were −1.7 cm and +0.24 m, with relative deviations of −4.45% and +0.85%. These values describe a single application of the algorithm and do not constitute an assessment of its accuracy at the stand level. The practical value of the study lies in combining a sequence of commands, parameters, and checks that enable users to trace how the final estimates are obtained. Further research will involve expanding the sample, examining the effects of processing parameters, and independently evaluating diameter and height estimates. A distinction is also made between the preliminary radius estimate obtained during stem detection and the result of the final circle fitting.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2342

To cite this article:
Herasymchuk, O. & Herhel, O. (2026). An algorithm for determining tree diameter and height from laser scanning data. *Agricultural Machines*, *52*, 167-174. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2342

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 630*5:528.8

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДІАМЕТРА ТА ВИСОТИ ДЕРЕВ ЗА ДАНИМИ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

О.П. Герасимчук*, О.В. Гергель

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
Лазерне сканування,
хмара точок,
TreeLS,
переріз стовбура,
апроксимація,
таксація дерев

Історія публікації:
Отримано 17.09.2026
Прорецензовано 02.10.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

****Автор для листування:***
alex_gop_ukr@ukr.net

АНОТАЦІЯ

Розглянуто послідовність визначення діаметра та висоти окремих дерев за даними лазерного сканування із застосуванням пакета TreeLS у середовищі R. Мета роботи полягає у впорядкуванні алгоритму оброблення хмари точок, поясненні призначення його параметрів та демонстрації результату на прикладі одного дерева. Послідовність охоплює завантаження даних, нормалізацію висот відносно поверхні ґрунту, вилучення точок із від'ємними висотами, воксельне проріджування для пошуку дерев, визначення положення стовбурів, присвоєння точкам ідентифікаторів і виділення стовбурових точок. Діаметр визначають апроксимацією горизонтального шару колом із застосуванням ітеративно зваженого методу найменших квадратів. Висота шару становить 1,3 м, його товщина – 0,1 м, розмір вокселя для побудови карти стовбурів – 0,02 м. Наведено програмну реалізацію основних операцій та порядок перевірки геометрії перерізу. Висоту оцінюють за найбільшою нормалізованою висотною координатою точок, віднесених до дерева. Пояснено, чому такий розрахунок потребує контролю належності верхівки та повноти її збереження під час просторового відбору. Для дерева №1 отримано діаметр 36,5 см і висоту 28,54 м за польових значень відповідно 38,2 см та 28,30 м. Різниці становлять −1,7 см і +0,24 м, відносні відхилення – −4,45 % та +0,85 %. Ці значення характеризують окремий приклад застосування алгоритму і не є оцінкою його точності для насадження. Практичне значення роботи полягає у поєднанні послідовності команд, параметрів і перевірок, які дають змогу простежити формування кінцевих показників. Подальші дослідження передбачають розширення вибірки, перевірку впливу параметрів оброблення та незалежне оцінювання діаметра й висоти. Окремо розмежовано попередню оцінку радіуса під час пошуку стовбура та результат кінцевої апроксимації.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2342

Цитувати цю статтю:
Герасимчук, О. П. & Гергель, О. В. (2026). Алгоритм визначення діаметра та висоти дерев за даними лазерного сканування. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 167-174. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2342

ВСТУП

Діаметр стовбура та висота дерева належать до основних таксаційних показників. Їх використовують для оцінювання запасу та планування лісогосподарських заходів. Лазерне сканування дає змогу зберігати просторове представлення дерева у вигляді хмари точок. Перехід від хмари точок, отриманих в результаті лазерного сканування до таксаційних показників потребує визначення поверхні ґрунту, виокремлення окремого дерева, його стовбуру і застосування відповідної геометричної моделі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Порівняння статичного та ручного мобільного сканування, виконане *Bauwens et al. (2016)*, показує, що результат інвентаризації залежить від способу знімання й доступності поверхні стовбура. В огляді *Vandendaele et al. (2024)* систематизовано можливості повітряних і наземних платформ для лісових вимірювань. Наземне спостереження створює сприятливі умови для реєстрації нижньої частини стовбура, проте верхівка може залишатися закритою гілками або сусідніми кронами. Тому придатність хмари для визначення діаметра та висоти слід оцінювати окремо.

Для програмного визначення діаметра важливі дві послідовні операції: відбір точок стовбура та апроксимація його поверхні. *De Conto et al. (2017)* дослідили поєднання методів очищення й моделювання стовбурів і показали доцільність застосування перетворення Хафа разом зі стійкими методами апроксимації. Відповідні засоби реалізовано в пакеті TreeLS. Пакет дає змогу побудувати послідовність оброблення у вигляді алгоритму, явно задавати параметри та зберігати проміжні результати (*de Conto, 2020*).

Інший інструмент – пакет ITSMe – призначений для визначення структурних характеристик окремих дерев за хмарами точок і кількісними структурними моделями (*Terryn et al., 2023*). Він розширює набір доступних характеристик, зокрема показниками крони. Водночас, використання будь-якого пакета потребує коректного виділення дерева. Набір даних *Weiser et al. (2022)*, який поєднує лазерні хмари з вимірюваннями дерев, ілюструє значення узгоджених ідентифікаторів для перевірки результатів визначення таксаційних показників шляхом лазерного сканування.

В Україні цифрові способи визначення висоти розглянуто, зокрема, у працях *Бідолаха та ін. (2018)* і *Білоуса та ін. (2021)*. Перша робота досліджує застосування квадрокоптера з порівнянням показів висотомірів, друга – зіставлення наземних і фотограмметричних способів. Ці дослідження стосуються різних технологій вимірювання, проте підкреслюють спільну методичну вимогу: порівнювати показники того самого дерева та контролювати спосіб визначення його основи й верхівки.

Практична проблема полягає у переході від загальних можливостей програмного забезпечення до чіткої послідовності операцій. Без пояснення параметрів легко ототожнити попередній радіус, отриманий під час пошуку стовбура, з кінцевим або прийняти просторове обрізання за повну сегментацію дерева. У цій роботі систематизовано застосування наявних функцій TreeLS і визначено контрольні операції для кожного етапу. Розроблення нового математичного методу апроксимації не є предметом дослідження.

МЕТА СТАТТІ (ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ)

Мета дослідження – систематизувати алгоритм і програмну реалізацію визначення діаметра та висоти дерев за даними лазерного сканування в TreeLS, пояснити параметри оброблення та продемонструвати порівняння результатів із польовим вимірюванням модельного дерева.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використано надані Білоусом А. М. та Задорожнюком Р. М. матеріали лазерного сканування дерев і результати польових вимірювань. Авторський етап роботи охоплює оброблення в середовищі R та аналіз отриманих показників. Усі лінійні параметри алгоритму наведено для координат у метрах.

Розглянута хмара містить дерева з локальними позначеннями 1-3. Числове зіставлення виконано лише для дерева №1: у вихідному описі для нього наведено діаметр 38,2 см і висоту 28,30 м та результат TreeLS отримали 36,5 см і 28,54 м. Дерева №2 і №3 використано тільки для пояснення графічного відображення. Це демонстраційний випадок застосування алгоритму, а не вибіркова оцінка насадження.

Функція readTLS() завантажує координати й атрибути точок. Після імпорту перевіряють кількість точок, одиниці, діапазони координат, наявність класифікації ґрунту та сторонніх об'єктів. Середовище RStudio можна використовувати для запуску сценарію, але розрахункові операції виконують функції R і відповідних пакетів.

Нормалізацію виконують функцією tlsNormalize(keep_ground = FALSE). Вона використовує модель поверхні ґрунту, а за відсутності класифікованих точок грунту передбачає їх автоматичне визначення. Параметр keep_ground = FALSE вилучає ці точки з результату (*de Conto, 2020*). Фізичний зміст нормалізації описує формула (1).

$$z_{n,i} = z_i - z_g(x_i, y_i) \quad (1)$$

де $z_{n,i}$ – нормалізована висота точки, м; z_i – її вихідна висотна координата, м; $z_g(x_i, y_i)$ – висота поверхні ґрунту в тому самому плановому положенні, м.

Після нормалізації перевіряють відлік біля основи стовбурів. Вилучення точок із Z<0 є операцією очищення, а не виправленням моделі ґрунту: за помилково завищеної поверхні можуть бути втрачені придатні дані спостереження. В алгоритмі зберігають проміжний стан до такого відбору для можливості перевірки.

Для пошуку положення дерев створюють проріджену копію нормалізованої хмари за допомогою tlsSample() та smp.voxelize(0.02). Простір поділяють на вокселі зі стороною 0,02 м. Зменшена кількість точок використовується на етапі побудови карти. Присвоєння ідентифікаторів і визначення діаметра здійснюються для непрорідженої нормалізованої хмари. Таким чином, воксель 0,02 м не є кроком округлення кінцевого діаметра.

Карту дерев отримують командою treeMap(thin, map.hough(min_density = 0.2), 0). Перетворення Хафа виявляє геометричні структури, подібні до перерізів стовбурів. Значення min_density є внутрішнім порогом щільності заповнення комірок. Після пошуку положення центрів накладають на вихідну хмару й перевіряють відсутність пропущених або хибно виділених стовбурів.

Функція treePoints(tls, map, trp.crop()) присвоює точкам TreeID за їхнім розташуванням у заданій околиці центра дерева. За документованими стандартними параметрами trp.crop(l = 1, circle = TRUE) це кругова область радіусом 1 м (de Conto, 2020). Такий відбір зручний для роботи зі стовбуром, але не відокремлює крону за її біологічними границями. Для похилого дерева або зміщеної верхівки частина потрібних точок може залишитися поза областю.

Стовбурові точки класифікують функцією stemPoints() з методом stm.hough(). В алгоритмі прийнято h_step = 0.25, max_d = 0.5, h_base = c(1, 2.5), pixel_size = 0.025, min_density = 0.05 та min_votes = 2. Інтервал h_base задає початкову ділянку для пошуку стовбура; він не обмежує весь аналіз висотами 1-2,5 м. Крок h_step визначає поділ стовбура на висотні шари, тоді як pixel_size задає розмір комірки для геометричного пошуку. Сукупність параметрів подано в табл.1.

Діаметр на висоті 1,3 м визначають функцією tlsInventory() з параметрами dh = 1.3 і dw = 0.1. Для апроксимації явно задано shapeFit(shape = «circle», algorithm = «irls»). Скорочення IRLS означає ітеративно зважений метод найменших квадратів. На послідовних ітераціях змінюються вага спостереження, що дає змогу зменшити вплив точок, які погано узгоджуються з моделлю. У реалізації TreeLS цей підхід поєднано з числовою оптимізацією параметрів кола (*de Conto, 2020*).

Таблиця 1 – Основні параметри алгоритму оброблення

Операція	Параметри	Призначення та контроль
Нормалізація	keep_ground = FALSE	Відлік від поверхні ґрунту; перевірка основи стовбурів
Пошукова копія хмари	smp.voxelize(0.02)	Воксель 0,02 м; використання тільки для побудови карти дерев
Пошук дерев	map.hough(min_density = 0.2)	Поріг щільності комірок; візуальний контроль центрів
Присвоєння TreeID	trp.crop()	Просторовий відбір навколо центра; окрема перевірка верхівки
Пошук стовбуро-вих точок	h_step = 0.25; max_d = 0.5	Висотний крок 0,25 м; найбільший очікуваний діаметр 0,5 м

Операція	Параметри	Призначення та контроль
Початковий пошук	h_base = c(1, 2.5)	Базовий інтервал 1-2,5 м для ініціалізації пошуку
Дискретизація та пороги	pixel_size = 0.025; min_density = 0.05; min_votes = 2	Комірка 0,025 м; поріг щільності та перетворення Хафа
Кінцевий діаметр	dh = 1.3; dw = 0.1; circle; irls	Коло за стовбуровими точками у шарі 1,25 < Z < 1,35 м
Висота	max(Z) за TreeID	Максимум висоти відібраних точок; контроль і належність верхівки

До апроксимації залучають лише точки, позначені як стовбурові, у шарі поблизу 1,3 м. У перевіреному відкритому коді tlsInventory() межі задаються строгими нерівностями: 1,25< Z <1,35 м. Контрольний відбір точок використовує той самий вираз. Це усуває розбіжність між набором для перевірки та набором для апроксимації на самих межах шару.

Поперечний переріз у горизонтальній площині описують колом за формулою (2). Отриманий Radius у таблиці інвентаризації є радіусом цієї моделі. Округлення виконують тільки під час формування таблиці для подання результатів.

Висоту розраховують за найбільшою нормалізованою координатою Z серед точок із відповідним TreeID. Максимум обчислюють за всіма відібраними точками дерева, а не лише за точками стовбура. Перед використанням результату необхідно перевірити належність найвищих точок і збереження верхівки.

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = r^2 \quad (2)$$

де x_i, y_i – планові координати точок, м;

a, b – координати центра апроксимованого кола, м; r – його радіус, м.

$$D_{1,3} = 200r \quad (3)$$

де $D_{1,3}$ — діаметр на висоті 1,3 м, см.

$$H_j = \max\{z_{n,i} : i \in P_j\} \quad (4)$$

де H_j – оцінка висоти j-го дерева, м;

P_j – множина точок, віднесених до нього;

$z_{n,i}$ – нормалізована висота точки, м.

Для демонстраційного дерева розраховано різницю між значенням TreeLS і польовим значенням. За одного дерева неможливо встановити систематичність відхилення, мінливість або довірчі межі точності. Тому середньоквадратичну похибку для насадження та статистичну значущість різниць не оцінювали.

$$\Delta q = q_1 - q_2 \quad (5)$$

$$\delta q = 100\,\Delta q / q_2 \quad (6)$$

де q_1 і q_2 – відповідно програмне та польове значення одного показника в однакових одиницях; Δq – різниця у сантиметрах для діаметра або метрах для висоти; δq – відносне відхилення, %.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Результатом обробки є узгоджена послідовність імпорту, нормалізації, пошуку дерев, виділення стовбурів, апроксимації та формування таблиці.

Для відбору точок використано штатну функцію lidR::filter_poi(), щоб не змінювати вручну внутрішню таблицю об’єкта LAS. Сценарій зберігає неокруглені значення, окремо формує таблицю для представлення та записує інформацію про програмне середовище. Фіксація стану генератора випадкових чисел перед проріджуванням допомагає повторювати відбір у сумісному середовищі.

На рис. 1 показано результат виділення стовбурових точок. Така візуалізація дає змогу перевірити, чи збігається виділена структура з видимим стовбуром і чи не включено значні частини сусідніх об’єктів. Планова схема на рис. 2 доповнює перевірку взаємним положенням дерев.

Для перевірки діаметра необхідні не лише Radius та Error, а й кількість точок, їхній висотний діапазон і просторовий розподіл по периметру. Велика кількість точок на вузькій дузі не рівноцінна

повному охопленню стовбура. Невелике значення Error характеризує узгодженість із підібраною моделлю і не доводить відсутності зміщення відносно польового діаметра.

Слід розрізняти поле Radius у хмарі після stm.hough() та однойменне поле у результаті tlsInventory(). Перше містить попередню оцінку, пов'язану з дискретним пошуком, друге – результат кінцевої апроксимації. Для перевірки фактичного положення точок потрібно аналізувати їхні Z, а не лише значення h_radius.

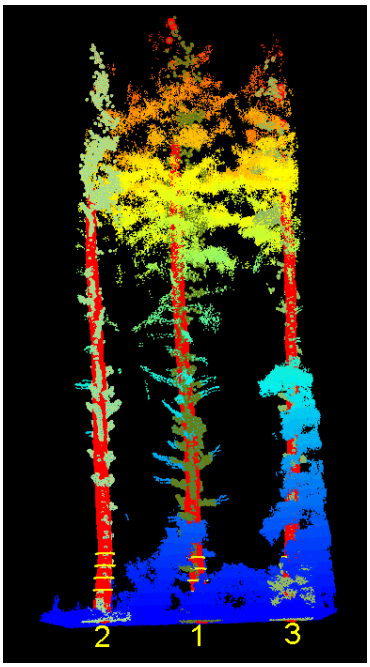


Рис. 1 – Хмара точок із виділеними стовбурами: 1-3 – локальні номери дерев; червоний колір – стовбурові точки; інші кольори відтворюють вихідне відображення хмари без кількісної висотної шкали

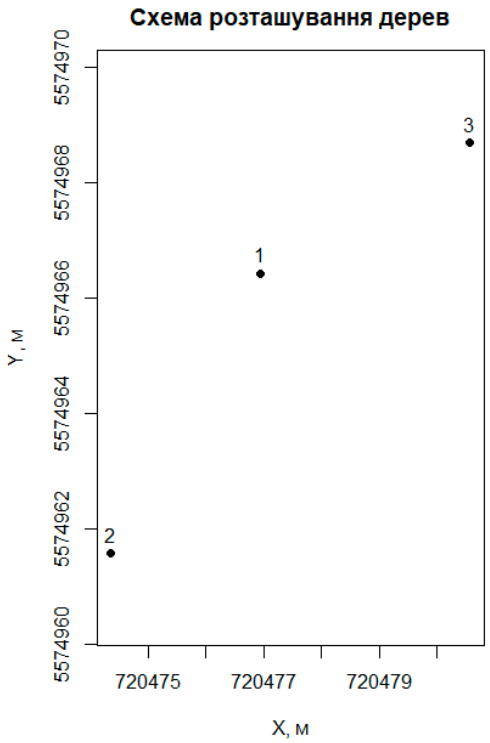


Рис. 2 – Планове положення дерев у системі координат: 1-3 – локальні номери дерев; X, Y - планові координати, м

Результати визначення показників наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння результатів для дерева №1

Показник	Польовий обмір	TreeLS, IRLS	Різниця Δq	Відносне відхилення δq, %
Діаметр на висоті 1,3 м, см	38,2	36,5	−1,7	−4,45
Висота, м	28,30	28,54	+0,24	+0,85

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Діаметр, отриманий у TreeLS, становить 36,5 см і є на 1,7 см меншим від польового значення 38,2 см. Відносне відхилення дорівнює −4,45 %. Програмна оцінка висоти становить 28,54 м, що на 0,24 м, або на 0,85 %, перевищує польове значення 28,30 м. Відсотки розраховано за наведеними округленими вихідними показниками.

Для модельного дерева відносне розходження діаметрів більше, ніж висот. Однак це не означає, що визначення висоти за хмарою загалом точніше. Показники отримано різними операціями: діаметр характеризує локальний переріз, а висота залежить від найвищої точки та нормалізації. Різні знаки відхилень також не дають підстав застосовувати спільну поправку до обох показників.

Можливими причинами розходження діаметрів є неповне спостереження перерізу, нерівність кори, некругла форма стовбура та відмінність між польовим способом і круговою апроксимацією. Якщо польовий діаметр отримують з обхвату, він є еквівалентним діаметром кола; якщо мірною вилкою – залежить від напрямів прикладання.

Різниця висот може бути пов’язана як із візуванням верхівки під час польового обміру, так і з положенням ґрунтової поверхні, сторонніми найвищими точками або просторовим відбором хмари. Навіть близькість двох значень не засвідчує, що всі ці операції виконано безпомилково. Українські дослідження вимірювань висоти також показують необхідність оцінювати конкретний спосіб спостереження й контрольних процедур (*Білоус та ін., 2021*).

Наступним етапом передбачається формування вибірки дерев різних діаметрів і форми стовбурів. Для кожного дерева слід фіксувати дату сканування й вимірювання, модель приладу, спосіб визначення діаметра та висоти, повторність спостережень і характеристики хмари. Це дасть змогу окремо оцінити середнє зміщення, середню абсолютну та середньоквадратичну різниці, а також залежність відхилень від розмірів дерев.

Доцільно перевірити чутливість результатів до розміру вокселя, товщини шару навколо 1,3 м, параметрів пошуку стовбурів і способу апроксимації. Змінювати параметри потрібно за визначеним планом і оцінювати їх на незалежних контрольних деревах, щоб не підбирати налаштування лише під один відомий діаметр. Для похилих і некруглих стовбурів варто порівняти горизонтальне коло з просторовою моделлю циліндра.

Окреме завдання – перевірка виділення повної крони та верхівки. Потрібно порівняти просторове обрізання з методами сегментації цілого дерева. Після перевірки базових показників можна перейти до профілю стовбура, характеристик крони та структурних моделей, зокрема з використанням ITSMe (*Terryn et al., 2023*).

ВИСНОВКИ

1. Систематизовано алгоритм визначення діаметра та висоти дерев у TreeLS: від нормалізації хмари й пошуку стовбурів до апроксимації перерізу та формування підсумкових записів.

2. В запропонованому алгоритмі послідовності діаметр визначають круговою апроксимацією методом ітеративно зважених найменших квадратів у шарі завтовшки 0,1 м навколо висоти 1,3 м. Воксельне проріджування зі стороною 0,02 м застосовують для пошуку дерев; кінцеву апроксимацію виконують за непрорідженою нормалізованою хмарою.

3. Для модельного дерева діаметр за TreeLS становив 36,5 см проти 38,2 см за польовим обміром, висота – 28,54 м проти 28,30 м. Різниці дорівнюють відповідно −1,7 см (−4,45 %) та +0,24 м (+0,85 %).

4. Умовами коректного застосування алгоритму є перевірка поверхні грунту, просторового охоплення перерізу та належності верхівки. Подальша перевірка потребує розширеної вибірки зіставлених дерев і дослідження впливу параметрів обробки.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Bauwens S., Bartholomeus H., Calders K., Lejeune P. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. Forests. 2016. Vol. 7, No. 6. Article 127. DOI: https://doi.org/10.3390/f7060127.

de Conto T. TreeLS: Terrestrial point cloud processing of forest data. Version 2.0.2 : R package documentation. 2020. URL: https://rdrr.io/cran/TreeLS/.

de Conto T., Olofsson K., Görgens E. B., Rodriguez L. C. E., Almeida G. Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning. Computers and Electronics in Agriculture. 2017. Vol. 143. P. 165–176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.019.

Terryn L., Calders K., Åkerblom M., Bartholomeus H., Disney M., Levick S., Origo N., Raumonen P., Verbeeck H. Analysing individual 3D tree structure using the R package ITSMe. Methods in Ecology and Evolution. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 231–241. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.14026.

Vandendaele B., Pelletier G., Hurley Poitras P., Saunders J. High-density LiDAR point clouds in precision forestry: Insights from seven years of research & development. Edmundston : Northern Hardwoods Research Institute, 2024.

Weiser H., Schäfer J., Winiwarter L., Krašovec N., Fassnacht F. E., Höfle B. Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests. Earth System Science Data. 2022. Vol. 14, No. 7. P. 2989–3012. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-14-2989-2022.

Бідолах Д. І., Білоус А. М., Кузьович В. С. Вимірювання висоти дерев і чагарників із використанням квадрокоптера. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т. 28, № 1. С. 24–27. DOI: https://doi.org/10.15421/40280104.

Білоус А. М., Дячук П. П., Задорожнюк Р. М., Мацала М. С., Бур'янчук М. М. Точність вимірювання висоти дерев різними способами. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2021. Т. 12, № 1. С. 6–16. DOI: https://doi.org/10.31548/forest2021.01.001.