

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ ДЕРЕВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КВАДРОКОПТЕРА

Д. І. Бідолах, кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
orcid.org/0000-0003-0248-3731

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

А. М. Білоус, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий
співробітник, *orcid.org/0000-0002-7589-4307*

Національний університет біоресурсів і природокористування України

В. С. Кузьович, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

E-mail: dimbid@ukr.net

Питання підвищення точності вимірювання висоти дерев і чагарників не втрачає актуальності й має практичну значущість для лісового та садово-паркового господарства, оскільки впливає на точність визначення об'єму окремих дерев і запасу деревостану в цілому. Це питання також є важливим для ландшафтно-архітектурного планування та проведення інвентаризації лісових і зелених насаджень.

Метою дослідження було встановлення точності вимірювання висоти дерев за допомогою квадрокоптера шляхом порівняння даних результатів із їхніми істинними значеннями – вимірів довжин зрубаних стовбурів. Додатково проводили визначення висот за допомогою висотоміра Анучіна та мірної вилки. Для вимірювання висот використовували безпілотний літальний апарат (БПЛА) DJI Phantom 4, який оператор встановлював на рівні кореневої шийки ростучого дерева для фіксації точки «нуль» і піднімав у режимі зйомки 90° до найвищої точки дерева.

Спосіб, який ми запропонували, дає змогу усунути основні недоліки висотомірів: необхідність закладання базисної віддалі, підвищення зручності та точності візування на верхівку дерева, усунення впливу рельєфу місцевості, кривизни стовбура деревної рослини на результати вимірювань та забезпечення більшої точності.

Встановлено, що відносна похибка вимірювання висоти дерева за допомогою БПЛА становить менше ніж 1%. Основним недоліком цього способу є складність його реалізації в умовах високоповного деревостану та необхідність залучення кваліфікованих виконавців.

Такий спосіб вимірювання висоти можна застосовувати для потреб лісової таксації для встановлення розряду висоти, класу бонітету, а також під час інвентаризації зелених насаджень.

Ключові слова: висотомір, таксація, безпілотний літальний апарат, Phantom 4.

Актуальність і аналіз останніх досліджень. Висота деревних і чагарникових рослин є важливим таксаційним показником, який використовують для визначення об'єму стовбурів, запасу деревостану, бонітету, приросту та аналізу росту насаджень. Саме тому проблема оперативного й точного вимірювання висоти дерев і чагарників є актуальною й має практичне значення для лісового та садово-паркового господарства.

Загальновідомо, що точність вимірювання висоти дерев впливає на точність визначення об'єму стовбурів дерев і запасу всього деревостану. Встановлення розрядів висот при відведенні ділянок у рубку впливає на результати матеріально-грошової оцінки деревостанів. Особливе значення точність вимірювання висоти дерев має для закладання кругових пробних площ під час польових робіт національної інвентаризації лісів.

У галузі садово-паркового господарства висоти деревних і чагарникових видів визначають у процесі інвентаризації зелених насаджень і розробки проектів реконструкцій. При цьому висота дерев і кущів актуальна не тільки для визначення об'ємів стовбурів, а й має важливе значення для правильного ландшафтно-архітектурного планування та обґрунтування прийняття рішень щодо формування ландшафтів у вертикальній площині.

Дедалі частіше науковці (Bragg, 2014; Shevelina & Korostelev, 2006; Artemev et al., 2013; Panagiotidis et al., 2017; Williams et al., 1994; Bidolakh et al., 2018) шукають способи вдосконалення наявних підходів до вимірювання висот деревних і чагарникових рослин, які б дали змогу прискорити цей процес, покращити його точність та ефективність, усунути залежність

поширених методів від впливу рельєфу та базисної віддалі.

На зміну висотомірам, робота яких побудована на геометричному, тригонометричному й оптичному принципах, прийшли оптико-механічні, електронні, ультразвукові та лазерні висотоміри, які дали змогу підвищити точність і прискорити процес отримання інформації (Bragg, 2014; Baginskii, 2013). Результати досліджень можливості використання різних за принципом роботи висотомірів (Williams et al., 1994) засвідчили, що найточнішими серед них є сучасні лазерні інструменти. При цьому більшість сучасних висотомірів дають змогу проводити вимірювання не лише висоти, а й горизонтальної проекції крон, відстані, ухилів і кутів. Велика кількість таких приладів не потребує закладання базисної віддалі, що значно спрощує процес виконання вимірювань. Проте ці інструменти не завжди можуть усунути вплив таких факторів, як пересіченість рельєфу, погана видимість вершини, багатовершинність деревних і чагарникових рослин.

Серед значної кількості останніх досліджень за цією тематикою можна виділити принципово нові підходи до неконтактних методів визначення висоти дерев і чагарників. Зокрема, велика кількість закордонних науковців опрацьовують нові підходи щодо використання матеріалів ДЗЗ (Degerickx et al., 2017) із безпілотних літальних апаратів для дослідження параметрів деревостанів (Markham, 2017), у тому числі його висоти (Panagiotidis et al., 2017; Bragg, 2014). Автори (Shevelina & Korostelev, 2006); Artemev et al., 2013) зробили спробу наближеного визначення висоти та діаметра із земної поверхні для таксації ростучого дерева за допомогою наземної цифрової фотозйомки.

Науковці (Holiaka et al., 2018) дослідили можливості використання аерофотозйомки з безпілотного літального апарата для отримання та обробки зображень стереофотограмметричними підходами з метою ідентифікації сосни звичайної та оцінки її висоти у зімкнутих деревостанах Чорнобильської зони відчуження.

Нами проведено низку досліджень щодо можливості об'єднання вищенаведених підходів шляхом використання квадрокоптера для безпосереднього вимірювання висоти ростучих дерев і чаргарників за показниками бортових датчиків БПЛА (Bidolakh et al., 2017; Bidolakh et al., 2018). Для перевірки точності такого підходу використовували порівняння вимірювань із результатами, отриманими за допомогою різних висотомірів.

Метою дослідження було визначення точності вимірювання висоти дерев за допомогою квадрокоптера шляхом порівняння даних результатів із їхніми істинними значеннями. Для досягнення цієї мети поставлено завдання визначити висоти окремих дерев за допомогою БПЛА з наступною перевіркою точності результатів шляхом вимірювання їхньої довжини після рубки. Додатково проводили визначення висот за допомогою висотоміра Анучіна та мірної вилки.

Матеріали і методи дослідження.

Збирання експериментальних даних проводили на базі Чернівецького лісництва Чернівецького військового лісгоспу (квартал 45, виділ 6), де виконували останній прийом рівномірно-поступової рубки в буковому насадженні з такими, відповідно до матеріалів таксації, основними лісівничо-таксаційними показниками: склад деревостану – 10 Бкл; вік – 112 років; середній діаметр – 40 см; висота деревостану – 33 м; бонітет – I; тип лісу – D₃D-ГБ; повнота – 0,40, запас на 1 га – 280 м³.

Вимірювання висот дерев проводили двома відомими способами. Перший підхід передбачав використання оптичного висотоміра Анучіна для визначення висоти (H_{BA}), який наводили на кореневу шийку та верхівку дерева з базисної віддалі, та читання результатів згідно з інструкціями щодо використання цього інструменту (Anuchin, 1982). При цьому виникали складнощі з візуванням приладу на верхівку через досить значну висоту дерев і з відкладанням базисної віддалі через складний рельєф місцевості. Другий спосіб передбачав використання мірної вилки як примітивного польового висотоміра. При цьому, для вимірювання висоти дерев ($H_{M.B}$) її доукомплектували виском, наводили на вершину дерев із фіксуванням висоти по рухомій ніжці, до значення якої додавали висоту до рівня ока спостерігача. Під час вимірювання виникали аналогічні до попереднього способу проблеми із візуванням та відкладанням базисної віддалі.

Як третій спосіб було проведено вимірювання висот дерев бука лісового (H_{KB}) із використанням БПЛА DJI Phantom 4, який реалізовували таким чином. Після завершення підготовчих робіт (калібрування компаса дрона й отримання чіткого супутникового сигналу в системах GPS/Глонасс) проводили фіксацію висоти точки 0. Для цього БПЛА встановлювали на рівні кореневої шийки ростучого дерева, що підлягає вимірюванню. Після цього літальний апарат піднімали й керували ним у ручному режимі доти, доки центр прицілу його камери в режимі зйомки 90° не буде наведено на найвищу точку дерева (Bidolakh et al., 2017; Bidolakh et al., 2018).

При цьому виконували її точне візування завдяки дисплею пульта керуван-

ня та фіксацію у тривимірній системі координат x, y, z із можливістю виконання фотографування камерою безпілотного літального апарата. За такої умови як атрибут кожної фотографії верхівки дерева зберігається інформація про його координати та висоту, яка розраховується GPS-модулем автоматично.

Результати дослідження та їх обговорення. Після збирання інформації щодо висот ростучих дерев проводили їх рубку та вимірювали відповідні довжини кожного дерева (L) за допомогою мірної рулетки, до яких додавали висоти кожного пня над рівнем кореневої шийки. Отримані дані зведено та проаналізовано у табл. 1.

Порівняння статистичних показників трьох способів, що наведені в табл. 2, демонструє перевагу способу з використанням БПЛА. Це можна пояснити можливістю точного наведення приладу на верхівку дерева або чагарника, що досягається за рахунок візування його камери під прямим кутом до рослини. Окрім того, покращенню якості та спрощенню проведення вимірювань сприяє те, що немає потреби закладати базисну відстань, як-от для більшості висотомірів.

Графічна інтерпретація відхилень від істинного значення при вимірюванні висот за проведеними у цьому дослідженні способами (рисунок) свідчить про найменшу кількість таких відхилень результатів саме для способу з використанням квадрокоптера. Найбільший розкид відхилень від істинних значень дає вимірювання з використанням мірної вилки, що пояснюється її прямим призначенням для вимірювання діаметрів стовбурів (визначення висоти є лише додатковою функцією цього інструменту).

Крім того, слід зауважити залежність точності вимірювань у разі вико-

ристання мірної вилки та висотоміра Анучіна від рельєфу при закладанні базисної віддалі. Адже на практиці не завжди можливо знайти місце для проведення вимірювань, що розташоване на тому самому вертикальному рівні, що й саме дерево або чагарник. А в умовах загущеного деревостану сам процес вибору місця, з якого буде видно вершину рослини, для проведення вимірювань за допомогою висотомірів є досить складним, що також суттєво впливає на точність та якість отриманих результатів.

При цьому не можна обійти увагою також основні недоліки способу вимірювання висоти з використанням квадрокоптера, які полягають у труднощах його реалізації в умовах загущеного деревостану через складність підняття БПЛА до верхівки, залежність від погодних умов (неможливість виконання вимірювань за низької температури, під час дощу та сильного вітру) і потреби у відповідній кваліфікації виконавців робіт.

Аналіз технічних параметрів квадрокоптера DJI Phantom 4 свідчить, що за вимірювання висоти положення цього високотехнічного приладу відповідає GPS-приймач, який здатний фіксувати положення квадрокоптера у тривимірному просторі з точністю вертикального позиціонування $\pm 0,1$ м. Це дає змогу робити висновки про технічні можливості для вимірювання висоти з точністю до 0,5 % – за висоти дерева 20 м або до 1 % за висоти до 40 м. При цьому оптичний висотомір Анучіна (ВА), який здебільшого використовують у практичній діяльності, дає змогу проводити вимірювання висот із точністю близько ± 4 % (Anuchin, 1982) в оптимальних умовах, які досить складно забезпечити в лісових і паркових деревостанах.

1. Статистичні дані результатів вимірювання висот дерев

№ пор.	Вид	d, см	Нкв. (квадрокоптер)	Нм.в. (мірна вилка)	НВА (висотомір Анучіна)	L, м (зрізаного дерева)	Δ кв	Δ м.в	Δ ВА	δкв, %	δм.в., %	δВА, %
1	Бкл	44	33,9	31,5	33,5	33,1	0,8	-1,6	0,4	0,56	3,47	1,69
2	Бкл	45	34,0	32,5	32,5	33,3	0,7	-0,8	-0,8	0,42	1,13	0,01
3	Бкл	51	33,0	34,5	33	33,5	-0,5	1	-0,5	0,31	0,54	0,16
4	Бкл	42,5	32,2	33,4	30,5	33,0	-0,8	0,4	-2,5	0,73	0,02	2,56
5	Бкл	42	30,2	29,0	28,5	30,4	-0,2	-1,4	-1,9	0,06	2,77	1,00
6	Бкл	45	34,0	30,5	32,5	33,6	0,4	-3,1	-1,1	0,12	11,31	0,04
7	Бкл	49	33,2	34,0	33,0	33,5	-0,3	0,5	-0,5	0,12	0,06	0,16
8	Бкл	44,5	33,0	30,5	30,5	31,9	1,1	-1,4	-1,4	1,10	2,77	0,25
9	Бкл	48,5	33,1	29,0	32,0	33,2	-0,1	-4,2	-1,2	0,02	19,92	0,09
10	Бкл	52,5	35,0	41,5	34,5	35,5	-0,5	6	-1	0,31	32,91	0,01
11	Бкл	44,5	33,8	38,5	32,0	33,4	0,4	5,1	-1,4	0,12	23,39	0,25
12	Бкл	50	32,7	34,5	31,0	33,3	-0,6	1,2	-2,3	0,43	0,88	1,96
13	Бкл	53	35,9	44,5	40,0	36,8	-0,9	7,7	3,2	0,91	55,30	16,81
14	Бкл	43	33,5	31,6	33,0	32,9	0,6	-1,3	0,1	0,30	2,44	1,00
15	Бкл	44	33,8	32,5	33,0	33,4	0,4	-0,9	-0,4	0,12	1,35	0,25
16	Бкл	49,5	33,1	34,4	32,5	33,8	-0,7	0,6	-1,3	0,57	0,11	0,16
17	Бкл	42,5	33,8	33,0	30,5	32,3	1,5	0,7	-1,8	2,09	0,19	0,81
18	Бкл	41	30,2	29,5	28,0	30,1	0,1	-0,6	-2,1	0,00	0,75	1,44
19	Бкл	44	33,8	29,5	32,0	33,1	0,7	-3,6	-1,1	0,42	14,93	0,04
20	Бкл	49	33,2	33,0	33,5	33,4	-0,2	-0,4	0,1	0,06	0,44	1,00
21	Бкл	45	33,4	30,0	30,5	32,1	1,3	-2,1	-1,6	1,55	5,59	0,49
22	Бкл	48,5	32,9	30,0	32,5	33,3	-0,4	-3,3	-0,8	0,21	12,70	0,01
23	Бкл	52,5	35,2	41,0	34,5	35,6	-0,4	5,4	-1,1	0,21	26,39	0,04
24	Бкл	45	33,8	38,0	31,5	33,3	0,5	4,7	-1,8	0,20	19,68	0,81
25	Бкл	49	32,6	34,0	31,5	33,4	-0,8	0,6	-1,9	0,73	0,11	1,00
26	Бкл	53,5	36,0	43,5	40,5	36,9	-0,9	6,6	3,6	0,91	40,15	20,25
27	Бкл	42	30,0	29,5	27,5	30,2	-0,2	-0,7	-2,7	0,06	0,93	3,24
28	Бкл	44,5	33,5	30,0	32,5	33	0,5	-3	-0,5	0,20	10,65	0,16
29	Бкл	47	32,5	32,0	32,5	33,5	-1	-1,5	-1	1,11	3,11	0,01
30	Бкл	46,5	33,3	29,5	30,5	32,2	1,1	-2,7	-1,7	1,10	8,78	0,64

Окрім вищенаведених переваг використання квадрокоптера для вимірювання висоти дерев і чагарників цей прилад дає змогу також

перевести процес таксації лісу та садово-паркових об'єктів на новий – технічний рівень, коли окрім визначення висоти рослин створю-

2. Підсумкові описові статистики результатів вимірювання висот дерев

Статистичні показники	Діаметр, см	Н _{кв.} (квадрокоптер)	Н _{м.в.} (мірна вилка)	Н _{ва.} (висотомір Анучіна)
Середнє арифметичне значення	46,60	33,29	33,50	32,33
Сер. квадратичне відхилення	-	1,40	4,40	2,73
Стандартна помилка	-	0,25	0,80	0,50
Коефіцієнт мінливості, %	-	4,19	13,14	8,45
Похибка вимірювання	-	0,05	0,26	-0,90
Систематична помилка, м	-	15,03	302,77	56,34
Середня випадкова помилка вимірювань	-	0,72	3,23	1,39

ються умови для фотофіксації їхніх верхівок, збереження інформації про місце та час виконання зйомки, що може використовуватись як документальне підтвердження достовірності проведених вимірювань. Це, своєю чергою, створює нові можливості та перспективи для потреб контролю та моніторингу за станом зелених насаджень, а також спрощує проведення подальшої комп'ютерної та статистичної обробки інформації.

Одержані результати свідчать про можливість і перспективність застосування цього способу для потреб лісо- та парковпорядкування, для встановлення розряду висот при відведенні ділянок у рубки, інвентаризації зелених насаджень, створення бази даних вимірів, а також для виконання інших наукових досліджень.

Висновки і перспективи. Перевірка можливості використання квадрокоптера для вимірювання висоти

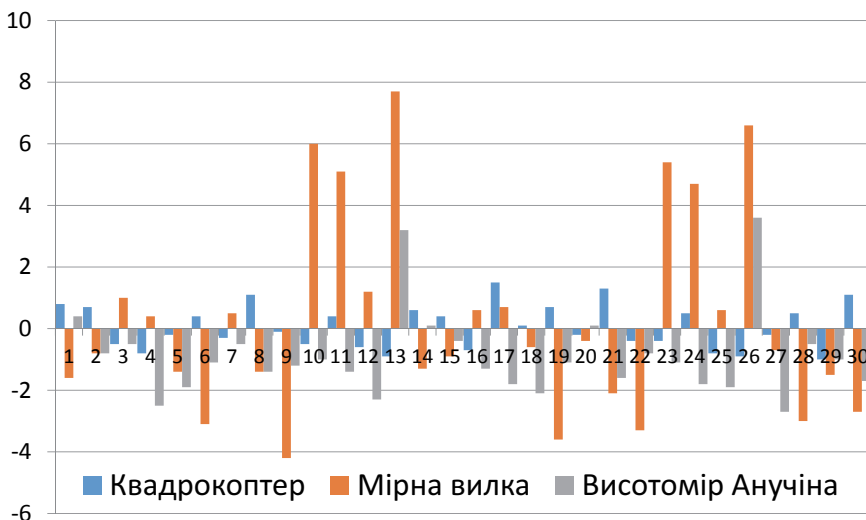


Рисунок. Похибки вимірювання за різних способів

дерев дала змогу сформулювати такі висновки.

Використання безпілотного літального апарата для визначення висот деревно-чагарникових видів дає змогу проводити вимірювання з високою точністю (відносна похибка вимірювання – до 1%).

Вимірювання висот рослин із використанням квадрокоптера дає можливість проводити візування на реальну вершину дерева, усуває необхідність закладання базисної віддалі, покращує якість та спрощує виконання робіт в умовах складного рельєфу. Однак використання дрона обмежене погодними умовами, густотою деревостану та вимагає відповідної кваліфікації виконавців.

Технічне оснащення БПЛА створює умови для збереження як простої, так і висотної атрибутивної інформації в цифровому вигляді разом із фотознімками вершин і створює умови для подальшої комп'ютерної та статистичної обробки інформації.

Список літератури

- Anuchin, N. P. (1982). Forest taxation. Moscow: Forest industry, 552 [in Russian].
- Artemev, O. S., Vais, A. A., & Naidenko, E. A. (2013). Methods of the heights measuring of trees on the materials of a digital terraneous photographing. Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University, 8, 122–125 [in Russian].
- Baginskii, V. F. (2013). Forest Taxation: Tutorial. Gomel: GGU im. F. Skoriny [in Russian].
- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuzovych, V. S. (2018). Measurement of the tree and shrub height with the help of unmanned aerial vehicles. Scientific Herald NLTU Ukrainy, 28 (1), 24–27 [in Ukrainian].
- Bidolakh, D. I., Kuzovych, V. S., & Bilous, A. M. (2017). A method of measuring the height of trees and shrubs. Patent UA, no. 12520 [in Ukrainian].
- Degerickx, J., Hermy, M., & Somers, B. (2017). Mapping functional urban green types using hyperspectral remote sensing. 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). <https://doi:10.1109/jurse.2017.7924553>.
- Dimitrios Panagiotidis, Azadeh Abdollahnejad, Peter Surov'ý & Vasco Chiteculo. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. International Journal of Remote Sensing, 38 (8–10), 2392–2410. <https://doi:10.1080/1431161.2016.1264028>
- Don, C. Bragg. (2014). Accurately Measuring the Height of (Real) Forest Trees. Journal of Forestry, 112 (1), 51–54. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5849/jof.13-065>.
- Holiaka, D. M., Kato, H., Yoschenko, V. I., et al. (2018). Identification and estimation of heights of scots pine trees in forest stands in the Chernobyl exclusion zone using stereophotogrammetry method. Scientific Bulletin of UNFU, 28 (10), 18–21. <https://doi.org/10.15421/40281003>.
- Markham, D. (2017). This startup will use drones to map forests and plant trees at 1/10th of the usual cost. Retrieved from <https://www.treehugger.com/clean-technology/startup-using-drones-plant-trees-110th-usual-cost.html>.
- Shevelina, I. V., & Korostelev, I. F. (2006). The using of digital cameras for taxing growing trees. The forests of the Urals and the economy in them: Sat Scientific Tr. Federal Agency for Education, Ural State Forestry University, 27, 277–281 [in Russian].
- Williams, M. S., Bechtold, W. A., & LaBau, V. J. (1994). Five Instruments for Measuring Tree Height: An Evaluation. Retrieved from https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_williams009.pdf.
- Zagreev, V. V., Gusev, N. N., Moshkalev, A. G., & Selimov, S. A. (1991). Forest taxation and forest inventory: Tutorial. Moscow: Ecology [in Russian].

D. I. Bidolakh, A. M. Bilous, V. S. Kuziovych (2019). The accuracy of measuring the height of trees with the use of a quadrocopter. UKRAINIAN JOURNAL OF FOREST AND WOOD SCIENCE, 10(3):19-26. <http://dx.doi.org/10.31548/forest2019.03.019>.

The issue of improving the accuracy of measuring the height of trees and shrubs is characterized by relevance and practical importance for forestry and landscape gardening due to the influence on the determination of the volume of individual trees and the growing stock. Such measuring is important for landscape and architectural planning and inventory of trees.

The purpose of the study was to check the accuracy of measuring the height of trees using a quadrocopter by comparing these results with their true values (measurements of the length of felled trees). In addition, the heights were determined using the Anuchin's optical hypsometer and a tree caliper. The UAV DJI Phantom 4 was used for measuring the heights. It was originally placed at the root collar of a growing tree to fix the "zero" point and taken off by the operator in 90° shooting mode to the highest point of the tree for calculating the height with GPS-receiver drone instruments. By this way, the information about coordinates and height of the top of the tree as attributes of each photo is stored in digital form.

The proposed approach to measuring the height of trees and shrubs using UAV, was developed to create a method that would offset the existing altimeters main disadvantages: the need to mark the base distance, increase the convenience and accuracy of aiming to the top of the tree, eliminate the influence of the terrain and the curvature of the tree on the measurement results and also provide better accuracy of measurements.

Checking the accuracy of this measurement process showed relative error of measurement < 1 % and better informational content compared to other methods. The main disadvantages of this method are the complexity of its implementation in conditions of dense stands and high requirement to the qualification of the operator.

Such an approach can be used for the forests mensuration needs, for establishing the height classes, inventory of green spaces, creating a database of measurements (with a photographic images of the tops of plants) as well as for other scientific research.

Keywords: *hypsometer, tree height determination method, unmanned aerial vehicle, Phantom 4.*

Отримано: 13.03.2019 р.