



А. М. Макаревич, А. М. Білоус

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ ДЕРЕВ РІЗНИМИ ВИСОТОМІРАМИ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Досліджено точність вимірювання висоти дерев зелених насаджень різними приладами та основними способами. Оцінено можливості використання поширених висотомірів для визначення показників висоти дерев в умовах урбанізованого середовища. Проведено порівняння результатів вимірювання висоти дерев зелених насаджень різних типів ландшафтів. Обґрунтовано доцільність їх використання у міському середовищі. Дослідження виконано на території Національного університету біоресурсів і природокористування України на ділянках зелених насаджень обмеженого користування навчальних корпусів та студентських гуртожитків. У дослідженні розглянуто п'ять варіантів вимірювання висоти ростучих дерев за використання різних висотомірів. Дослідні дані про висоту модельних дерев зібрано чотирма різними висотомірами (Suunto PM-5 (Фінляндія), Блюме-Лейса (Німеччина), Haglof EC II-D (Швеція), TruPulse 360B (США)) для 299 дерев 28 деревних видів. На основі висновків низки дослідників результати вимірів висотоміром-далекоміром TruPulse 360B в режимі роботи HD HT прийнято як контроль висоти дерева. Результати математичного аналізу проведених досліджень демонструють задовільну точність механічних і електронних тригонометричних висотомірів, що не перевищує 5 % рівня, в умовах урбанізованого середовища. Виявлено найнижчий показник систематичної похибки для електронного висотоміра Haglof EC II-D, що становить 0,001 м. Найнижче значення середньої випадкової помилки вимірювання висоти модельних дерев становить 0,45 м для механічного висотоміра Suunto PM-5. Лазерний висотомір-далекомір TruPulse 360B в режимі роботи VD (двох замірів) демонструє значення систематичної і середньої випадкової похибок $-0,67$ м та $1,00$ м відповідно. Графічний аналіз значень абсолютних відхилень показав точність і прецизійність вимірів тригонометричними висотомірами та заниження показників при збільшенні висоти дерева для висотоміра-далекоміра TruPulse 360B в режимі роботи VD. Зроблено висновок, що висотоміри, які працюють на основі властивостей синуса прямокутного трикутника (наприклад TruPulse 360B в режимі роботи VD) не рекомендовано використовувати для вимірювання висоти дерев, а висотоміри тригонометричного принципу дії придатні для таксації висоти дерев і можуть застосовуватися для інвентаризаційних, лісовпорядних та інших робіт, які пов'язані із лісівництвом та садово-парковим господарством.

Ключові слова: зелені насадження; інвентаризація; висотомір Suunto PM-5; висотомір Блюме-Лейса; висотомір Haglof EC II-D; висотомір-далекомір TruPulse 360B.

Вступ / Introduction

Висота дерева разом з діаметром на висоті 1,3 м, є одним з найважливіших параметрів дерев [8], зокрема під час інвентаризації лісів та зелених насаджень. Висота дерев часто використовується для обчислення біометричних показників як окремих дерев так і деревостанів загалом, зокрема: об'єму деревини, біомаси, запаса вуглецю, параметрів росту і продуктивності деревостанів [15]. Значення висоти дерев в умовах міста є навіть вищим, порівняно з лісовими насадженнями, оскільки точне значення висоти дерев має вплив на:

- 1) Міське планування та дизайн – знання висоти дерев дає змогу міським планувальникам і архітекторам ефективно враховувати зелені зони в містах, створюючи естетичні та функціонально вигідні ландшафтні рішення. Також висота дерев є важливим параметром для оцінки кількості та розташування зелених насаджень у місті. Це допомагає здійснювати стратегічне планування роз-

витку зелених зон [17].

- 2) Оцінка якісного стану дерев – визначення змін у висоті дерев може служити індикатором їхнього якісного стану. Зменшення висоти або припинення її збільшення може вказувати на проблеми з розвитком, захворюванням чи наявністю стресових умов росту і розвитку [7].
- 3) Аналіз мікроклімату – великі та високі дерева мають більший вплив на клімат урбанізованого середовища, забезпечуючи тінь, покращення якості повітря та регулювання температури. Визначення їхніх висот важливо для розуміння цього впливу [14].
- 4) Боротьба із забрудненням повітря – великі дерева за рахунок більшої листкової площі мають значно більший вплив на зменшення рівня забруднення повітря, поглинаючи деякі шкідливі речовини та затримуючи більшу кількість пилу. Вимір висоти дає змогу краще розуміти цей ефект та визначати оптимальне розташування дерев для покращення якості повітря [12].
- 5) Оцінювання екосистемних послуг дерев зелених наса-

Інформація про авторів:

Макаревич Анатолій Миколайович, аспірант, кафедра таксації лісу та лісового менеджменту. Email: amakarevych@nubip.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-9448-3028>

Білоус Андрій Михайлович, д-р с.-г. наук, професор, кафедра таксації лісу та лісового менеджменту. Email: bilous@nubip.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-7589-4307>

Цитування за ДСТУ: Макаревич А. М., Білоус А. М. Точність вимірювання висоти дерев різними висотомірами у міському середовищі. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 1. С. 36–41.

Citation APA: Makarevych, A. M., & Bilous, A. M. (2024). The accuracy of tree height measurement using different altimeters in an urban environment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(1), 36–41. <https://doi.org/10.36930/40340105>

дзень, зокрема за методикою i-Tree [1] та методикою наближеної таксації екосистемних послуг дерев [4].

Дані про висоту дерев та інші параметри зелених насаджень є важливим інформаційним ресурсом для розробки стратегій розвитку міського середовища та якісного управління ним з метою покращення якості життя населення міста.

Для вимірювання висоти дерев під час інвентаризації та інших облікових робіт переважно використовуються ручні інструменти, які істотно відрізняються за методикою вимірювання та вартістю висотомірів. На практиці виникають дискусії щодо обґрунтування доцільності використання того чи іншого вимірювального приладу та застосування різних підходів до вимірювання. Саме тому, виникла потреба у дослідному порівнянні використання основних найбільш розповсюджених в Україні висотомірів, зокрема перевірки точності вимірювання висоти дерев за використання висотоміра-далекоміра TruPulse 360B в режимі роботи VD.

Об'єкт дослідження – вимірювання висоти дерев в умовах урбанізованого середовища.

Предмет дослідження – точність вимірювання висоти дерев в умовах урбанізованого середовища з використанням різних висотомірів та способів вимірювання.

Мета роботи – порівняти точність вимірювання висоти дерев різними приладами і способами та обґрунтувати доцільність використання висотоміра-далекоміра TruPulse 360B в режимі роботи VD.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- провести вимірювання висоти дерев різними висотомірами в умовах урбанізованого середовища;
- визначити точність та проаналізувати прецизійність вимірювання висоти дерев;
- обґрунтувати особливості використання висотоміра-далекоміра TruPulse 360B в режимі роботи VD для визначення висоти дерев в умовах урбанізованого середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Висоту окремих дерев можна виміряти за допомогою прямих (шляхом вимірювання довжини стовбура зрубаного дерева, за допомогою телескопічних жердин, лазіння по деревах) та непрямих (за допомогою кутомірів, висотомірів, висотомірів-далекомірів) методів [8]. Найточнішим методом визначення висоти дерева є вимірювання довжини зрубаного дерева. Такий спосіб є руйнівним і на практиці застосовується рідко, особливо в умовах міського середовища. Окрім цього для вимірювання висоти дерев можливе застосування телескопічних жердин, але їх використовують тільки для невеликих рослин, як правило, до 15 м [9]. Також для прямого вимірювання висоти можливо вилазити на дерево, але цей метод не підходить для більшості дерев і застосовується виключно для наукових цілей [6].

Зараз широко використовуються непрямі методи з використанням кутомірів, висотомірів та висотомірів-далекомірів [11, 13]. Порівняно з прямими, непрямі методи більш ефективні для вищих дерев і можуть вимірювати дерева, які вищі за телескопічні жердини. Загально визнано, що визначення висоти дерев за допомогою висотомірів мають похибки вимірювань через низку різних факторів (структура лісу та дерев, деревний вид, висота дерева, рельєф, відстань вимірювання, помилки приладу і людини та ін.) [13]. Незважаючи на це такі вимірювання, проведені добре кваліфікованим персоналом, все ще вважаються найточнішими доступни-

ми оцінками висоти дерев [8]. Важливо наголосити, що у лісовій практиці помилки вимірювань традиційно вважаються випадковими [16]. Зазвичай інструменти для вимірювання висоти дерев базуються на тригонометричному принципі, для якого дослідники визначили малу систематичну та високу випадкову похибки [9].

Автори роботи [13] провели ретельне дослідження вимірювання висоти дерев шляхом вимірювання довжини стовбура зрубаного дерева і поширених висотомірів (висотомірів, висотомірів-далекомірів) на основі 2388 дерев ряду деревних видів (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) N. Karst, *Larix decidua* Mill., *Abies alba* Mill., *Quercus robur* L., *Fagus sylvatica* L., *Alnus glutinosa* Gaertn. та *Betula pendula* Roth.). Усі відібрані дерева були зрубані, а їхня вимірювана довжина використовувалася як еталон для підтвердження точності непрямих вимірювань висоти дерев різними приладами, включаючи висотоміри Suunto PM-5 (Suunto, Фінляндія) та EC II (Haglöf, Швеція), ультразвуковий висотомір VERTEX IV (Haglöf, Швеція) та висотомір-далекомір FOREST PRO (Laser Technology, США). Було виявлено, що тип приладу мав незначний вплив на точність вимірювання висоти дерев. Однак біометричні (висота дерева, вид дерева та вік дерева) та топографічні (нахил місцевості, висота н.р.м.) фактори викликали найбільшу похибку в оцінці висоти дерева. Загалом отримано вищу точність вимірювання висоти дерев для хвойних порід.

Відповідне дослідження було проведено в роботі [5] для лісових насаджень, що підтвердило висновки [16] про високу точність визначення висоти дерев за допомогою лазерних висотомірів-далекомірів.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводилося в зелених насадженнях обмеженого користування Національного університету біоресурсів і природокористування України за зростання дерев в умовах різних типів ландшафту.

Вимірювання висоти ростучих дерев виконували за допомогою механічних (Suunto PM-5, Блюме-Лейса) та електронних (Haglöf EC II-D) висотомірів тригонометричного принципу дії відповідно до інструкції із використання. Базисні відстані для тригонометричних висотомірів вимірювалися за допомогою мірної стрічки Vectron 24-2-030 30 м×10 мм. Для кожного окремого дерева здійснювалося три виміри, на основі яких обчислювалося середнє значення висоти дерева. Крім того, вимірювання виконували лазерним висотоміром-далекоміром TruPulse 360B в базовій комплектації. Зважаючи на мету дослідження та переважно рівнинні умови місцевості, прийнято рішення використати два режими вимірювання HD HT (англ. *Horizontal Distance Height*) та VD (англ. *Vertical Distance*) [10]. Режим HD HT використовує тригонометричний принцип дії та вимагає три візування, а режим VD ґрунтується на використанні властивостей прямокутного трикутника (синус) і потребує здійснення двох замірів.

Окрім типу та принципу їх роботи, висотоміри значною мірою відрізняються вартістю продажі. Дорогу лазерному висотоміру-далекоміру TruPulse 360B, вартість якого становить у приблизному діапазоні від 2780\$ до 3200\$ за базовий набір, дешевшими альтернативами є Haglöf EC II-D (240\$) та Suunto PM-5 (150-220\$). Винятком є висотомір Блюме-Лейса, який знято з виробництва, але за наявності може використовуватися.

Загальна кількість модельних дерев становила 299 од., які були розподілені за діаметром на висоті грудей від 4 до 108 см ступені товщини та мали висоти від 2 до 35 м (табл. 1). З таблиці видно, що розподіл вимірних значень висоти модельних дерев за ступенями товщини

характеризується показниками асиметрії та ексцесу, які для даної вибірки становлять відповідно 0,39 та -0,55.

Загалом у процесі дослідження визначення висоти проводили чотирма висотомірами використовуючи п'ять способів для 299 дерев 28 деревних видів.

Табл. 1. Розподіл модельних дерев за висотою та діаметром на висоті 1,3 м / Distribution of trees by height and DBH, 1.3 m

Ступені товщини, см	Висота, м																																							
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	31	32	35													
4	7	23	20	2	1																																			
8		1	16	12		1																																		
12		1	3	5	5	4			1			1																												
16					2	2	3	1	4	1																														
20						1	2	6	2	4		1	2						1																					
24							1		2	3	1	1	3	1			1	2	1																					
28					2			3	1	1	4	6	2	1	4				2		1																			
32										1	1	1	1	6	5	2	1	2																						
36		1						1		1										3	2																			
40												3	2	1	4	2	3		2	1			1																	
44					1							1	1	2	3		2	2	1	4	1	4				1														
48												1	1	2	1	2			1	1	1	2																		
52													1	2	1		2	4			1		1																	
56								1							1		1								1	2														
60															1		1	1																						
64																	1						1																	
72																		1																				1		
76																																				1				
80														1			1																							
92																																							1	
96																																								
108																																								

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Отримані за різними способами дані висоти та зведені до середніх значень для 299 модельних дерев наведено в табл. 2. Спираючись на висновки низки дослідників [2, 3, 5, 16] про найвищу точність визначення висоти ростучого дерева ручними лазерними висотомірами та відсутності можливості здійснити зрізування модельних дерев, прийнято рішення отримані результати висотоміром-далекоміром TruPulse 360 в режимі HD NT використовувати як контроль.

Результати статистичного оброблення даних (табл. 3) дають можливість оцінити точність використання різних висотомірів, що були використані в цьому дослідженні. Встановлено, що найбільша похибка вимірювання (систематична помилка) становила 0,67 м для висотоміра TruPulse 360B (VD), найнижча – 0,001 м для Haglöf EC II-D. Середня випадкова помилка найбільшою виявилася 1,00 для TruPulse 360B (VD) та найнижчою – 0,45 для Suunto PM-5.

Графічний аналіз значень абсолютних відхилень показує відхилення та характеризує прецизійність вимірів тригонометричними висотомірами (див. рисунок).

Табл. 2. Середні показники модельних дерев у зелених насадженнях / Results of measurements of model trees in green urban spaces

Деревний вид	Кількість дерев, шт	Середній діаметр, см	Середня висота дерев (м) за вимірювання різними приладами				
			Suunto PM-5	Haglöf EC II-D	TruPulse 360B (VD)	Блюме-Лейса	TruPulse 360B (HD NT) (контроль), м
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Betula pendula</i> Roth.	14	39,39	17,8	17,8	17,3	17,6	17,9
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	1	21,70	20,4	20,0	17,3	20,2	19,0
<i>Ulmus laevis</i> Pall.	1	38,30	16,3	16,0	15,5	16,4	16,2
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	108	24,34	10,1	10,1	9,4	10,2	10,1
<i>Crataegus oxyacantha</i> L.	2	14,95	5,4	5,4	6,2	5,5	5,0
<i>Juglans regia</i> L.	2	29,50	12,3	12,6	10,4	12,0	11,6
<i>Juglans nigra</i> L.	1	54,70	8,8	9,6	7,8	8,6	8,5
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	3	13,77	8,1	7,9	8,0	7,9	8,0
<i>Carpinus betulus</i> L.	4	32,48	17,2	17,6	15,2	17,5	16,7
<i>Quercus robur</i> L.	4	58,31	20,2	19,8	17,9	20,1	19,6
<i>Quercus rubra</i> L.	1	54,80	18,8	18,6	16,3	18,6	18,3
<i>Castanea sativa</i>	1	38,00	15,0	14,8	12,9	14,5	14,9
<i>Acer platanoides</i> L.	13	32,09	15,5	15,3	13,9	15,5	15,5
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	3	24,63	14,1	13,9	12,8	13,7	13,7
<i>Tilia cordata</i> Mill.	31	27,31	13,5	13,5	12,6	13,5	13,5
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	3	45,43	18,0	18,3	16,9	18,7	18,3
<i>Pinus sylvestris</i> L.	3	45,77	23,0	22,7	21,5	23,7	23,4
<i>Taxus baccata</i> L.	1	1,20	1,9	2,0	1,7	2,0	1,8

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Populus nigra</i> 'Italica'	3	99,63	19,5	19,7	18,9	19,9	19,6
<i>Populus pyramidalis</i> Rozier	4	71,45	31,9	32,1	29,8	32,0	32,0
<i>Thuja occidentalis</i> L.	79	19,12	8,4	8,4	8,1	8,4	8,4
<i>Thuja plicata</i>	3	6,47	3,6	3,2	3,3	3,6	3,5
<i>Cercis canadensis</i>	1	7,60	3,5	4,1	4,0	3,6	4,1
<i>Morus alba</i>	1	28,10	7,7	7,2	6,5	7,5	6,2
<i>Malus domestica</i> Borkh	1	27,10	8,5	8,4	8,0	8,5	8,9
<i>Picea abies</i>	9	34,83	16,6	16,7	16,5	17,1	16,7
<i>Picea omorika</i>	1	22,30	11,1	11,1	11,0	11,1	11,0
<i>Juniperus communis</i> L.	1	3,30	3,5	3,5	3,4	3,3	3,3

Табл. 3. Результати статистичного оброблення отриманих значень висоти дерев / Results of statistical processing of the obtained tree height values

Статистичні показники	Suunto PM-5	Haglöf EC II-D	TruPulse 360B (VD)	Блюме-Лейса	TruPulse 360B (HD HT) (контроль)
Середнє арифметичне значення, м	11,6	11,5	10,9	11,6	11,5
Середнє квадратичне відхилення, м	6,84	6,87	6,31	6,88	6,85
Стандартна помилка	0,40	0,40	0,37	0,40	0,40
Коефіцієнт мінливості, %	59,21	59,51	58,08	59,21	59,31
Показник точності дослідження, %	3,42	3,44	3,36	3,42	3,43
Систематична помилка, м	0,011	0,001	-0,673	0,077	–
Середня випадкова помилка вимірювань, м	0,45	0,48	1,00	0,53	–

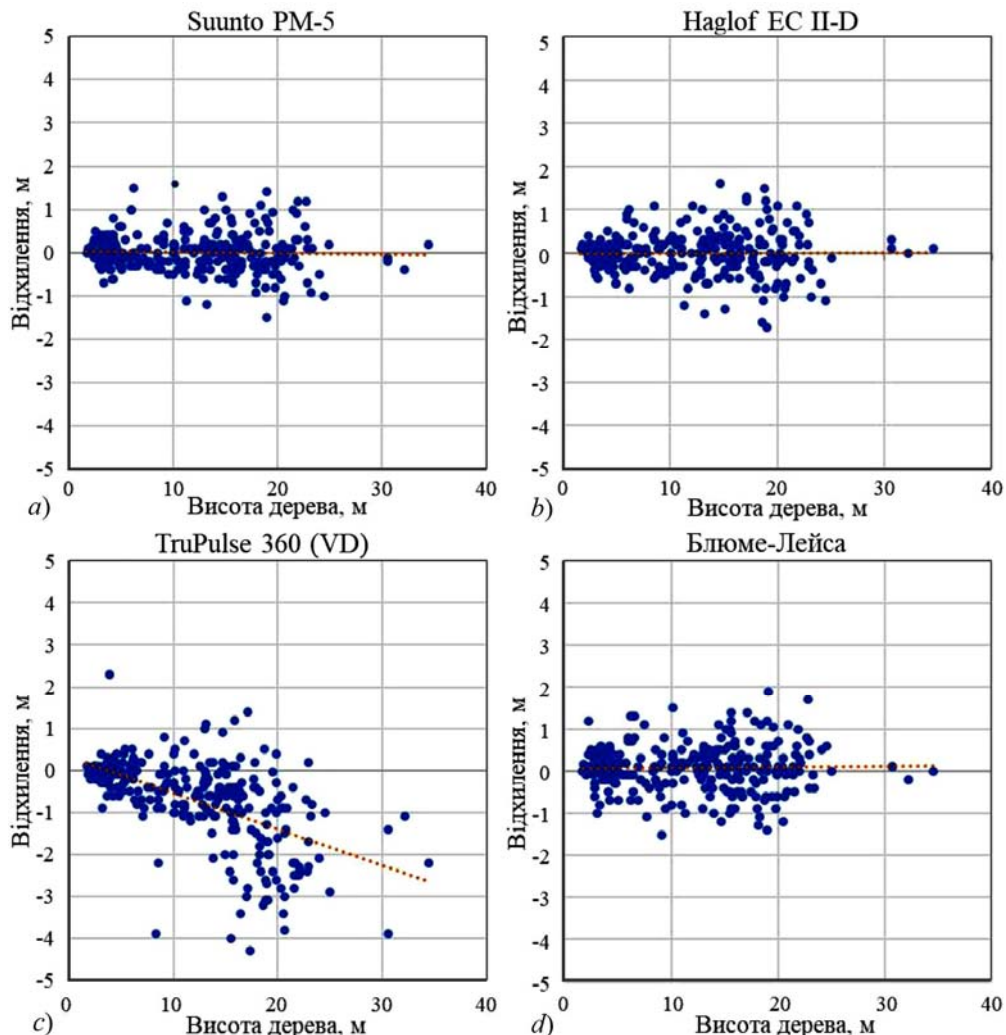


Рисунок. Відхилення результатів вимірювання висоти дерев / Deviation of tree height measurement results

Проблему заниження показників вимірювання висоти висотоміром-далекоміром TruPulse 360B (режим роботи VD), проілюстровано на рис. Якщо показники дерев висотою до 10 м мають незначне відхилення в сторону зменшення, то при збільшенні висоти спостерігається різке заниження значень порівняно з контрольними. Особливістю вимірюванням в цьому режимі є

встановлення як кута так і дистанції до точки візування при кожному з двох вимірів. Трав'яна рослинність, листя, хвоя, бічні гілки та гілки сусідніх дерев можуть створювати перепони лазеріві приладу точно визначити дистанцію до точки візування. Сюди можна також віднести відсутність чітко вираженої верхівки, або зміщення найвищої точки дерева відносно центру крони і

стовбура. Неправильне визначення дистанції до точки візування призводить до помилкових отриманих результатів. Така ситуація спостерігається в більш старших деревах, а відповідно і вищих, що мають шатроподібну розкидисту крону.

Принциповою різницею використання механічних висотомірів є суворі фіксація визначених виробником базисних відстаней. Для Suunto PM-5 вони складають 15 та 20 м і характеризують прилад непретиційністю показників висот вимірюваних дерев. Висотомір Блюме-Лейса має дещо ширший діапазон базисних відстаней, зокрема 15, 20, 30 і 40 м. Це теоретично мало забезпечувати деяку перевагу, адже для якісного вимірювання висоти відстань від вимірюваного дерева до таксатора повинна приблизно дорівнювати висоті самого дерева. Однак відносно велика ціна поділки висотоміра Блюме-Лейса ускладнює зчитування показників висоти дерев. На відміну від механічних, електронні висотоміри мають перевагу завдяки можливості довільної зміни базисної відстані. Зокрема Haglöf EC II-D має можливість встановлювати базисну відстань з ціною поділки в один метр у ручному режимі, що підвищує точність вимірювань. Збільшення базисної відстані для Haglöf EC II-D може приводити до погіршення видимості верхівки дерева та збільшення затрат часу на пошук задовільного місця для візування. Проблеми із візуванням на верхівку дерева частіше виникають при таксації щільних групових та рядових посадок або за наявності щільної забудови.

Обговорення результатів дослідження. Беручи до уваги проведені раніше дослідження наукової спільноти [2, 5, 8, 13], підтверджено, що висотоміри тригонометричного принципу дії дають можливість визначати висоту дерев в урбанізованому середовищі з достатньою точністю отриманих результатів. Висотоміри, що для визначення висоти використовують властивості прямокутних трикутників (наприклад TruPulse 360B в режимі роботи VD), не рекомендовано використовувати за потреби точної таксації дерев, адже зі збільшенням висоти дерев спостерігається заниження результатів вимірювання.

Як зазначено [13] ухил місцевості має вплив на точність вимірювання висотомірів, однак в міських умовах в переважній більшості випадків умови вимірювання на місцевості дають змогу розміститися таксатору на рівні росту дерева для здійснення облікових робіт.

Окремо потрібно розглянути особливості вимірювання висоти кронуваних дерев під час інвентаризації зелених насаджень [8]. У переважній більшості щорічне кронування дерев призводить до неактуальності даних про виміряну висоту дерев під час облікових робіт, отриманих на основі вимірювання фактичної висоти дерев з урахуванням порослі. У таких випадках варто робити примітки про стан кронovanого дерева і вимірювання висоти з урахуванням порослі або у стані після обрізування, щоб уникнути помилок у інтерпретації даних про висоту дерев.

Ще однією нестандартною ситуацією, яка впливає на точність вимірювання висоти є нахил дерева. Здебільшого дерева зростають вертикально і їхня висота та довжина мають тотожні значення, але не для дерев з нахилом. В такому випадку метод вимірювання довжини зрубаного дерева (як істинне значення) [5, 13] не буде давати уявлення про висоту дерева, тобто найвищу точ-

ку порівняно з найнижчою. Рішення даної проблеми знайшлося в дослідженні [8] під час порівняння класичних висотомірів з даними дистанційного зондування Землі. Методика визначення висоти нахилених дерев полягає в розміщенні таксатора перпендикулярно до лінії нахилу рівновіддалено від найнижчої та найвищої точки дерева.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати таку наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – доповнено експериментальне обґрунтування точності вимірювання висоти дерев за використання приладів Suunto PM-5, Haglöf EC II-D, Блюме-Лейса, TruPulse 360B в умовах урбанізованого середовища.

Практична значущість результатів дослідження – обґрунтовано рівнозначну можливість використання різновартісних висотомірів Suunto PM-5, Haglöf EC II-D, Блюме-Лейса та висотоміра-далекоміра TruPulse 360B (у режимі HD HT) для вимірювання висоти дерев в урбанізованому середовищі, а також доведено недоцільність використання TruPulse 360B у режимі VD за потреби точного вимірювання висоти дерев, зокрема у міському середовищі.

Висновки / Conclusions

Встановлено, що висотоміри які працюють за принципом властивостей прямокутного трикутника (наприклад TruPulse 360B в режимі VD), в умовах урбанізованого середовища показали заниження висоти дерев на $5,8^{+8,7}$ %, що може не забезпечити необхідність точного вимірювання висоти дерев.

З'ясовано, що точність вимірювання висоти дерев для потреб інвентаризації зелених насаджень може забезпечити застосування усіх використаних у дослідженні висотомірів, зокрема відносно недорогого, доступного для придбання широкому колу користувачів та простого у використанні висотоміра Suunto PM-5, який за результатами вимірювання не поступається дороговартісним лазерними висотомірами-далекомірами.

Дослідженням підтверджено, що використання як механічних так і електронних тригонометричних висотомірів у зелених насадженнях міського середовища відповідають заявленим виробниками значенням точності та забезпечує необхідну достовірність визначення показника висоти дерева, яка не перевищує рівня 5 % похибки.

References

1. Bidolakh, D. (2023). Assessment of ecosystem functions of green spaces as an important component of their inventory in the context of sustainable development of urban landscapes. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 14(1). <https://doi.org/10.31548/forest/1.2023.08>
2. Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuziyovych, V. S. (2019). The accuracy of measuring the height of trees with the use of a quadcopter. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 10(3), 19–26. <https://doi.org/10.31548/forest2019.03.019>
3. Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuziyovych, V. S. (2018). Measurement of the tree and shrub height with the help of unmanned aerial vehicles. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(1), 24–27. <https://doi.org/10.15421/40280104>
4. Bilous, A. M. (2020). Methodology for evaluating the ecosystem services of trees in garden and park objects. *Kolesnikov readings: abstracts of reports All-Ukrainian scientific and practical conference dedicated to the memory of O. I. Kolesnikov, Kharkiv, No-*

- vember 25, 2020, Kharkiv. "CP COMPRINT", 24–25. URL: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/Kolesnikovski-chytanna_2020.pdf
5. Bilous, A. M., Diachuk, P. P., Zadorozhniuk, R. M., Matsala, M. S., & Burianchuk, M. M. (2021). Accuracy of selected methods of measurement of tree heights. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 12(1), 6–16. <https://doi.org/10.31548/forest2021.01.001>
 6. Goodwin, A. N. (2004). Measuring tall tree heights from the ground. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:124077763>
 7. Israel, R., & Alo, A. (2023). Geodatabase and Health Risk Assessment of Avenue Trees within Three Selected Roads in the University of Ibadan, Ibadan, Nigeria (preprint). *Environmental and Earth Sciences*. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1161.v1>
 8. Jurjević, L., Liang, X., Gašparović, M., & Balenović, I. (2020). Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.014>
 9. Larjavaara, M., & Muller-Landau, H. C. (2013). Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(9), 793–801. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12071>
 10. Laser Technology Inc. (2017). *LTI TruPulse 360/360B Users Manual*. URL: https://iplasers.com/?gclid=CjwKCAiA44OtBhAOEiwAj4gpOWeMDSGBqFiAivzGxdaSWA8BMft32q26LdP8ANdfm_CElj6pKVPU-8hoCEH8QAvD_BwE
 11. Luoma, V., Saarinen, N., Wulder, M., White, J., Vastaranta, M., Holopainen, M., & Hyypä, J. (2017). Assessing Precision in Conventional Field Measurements of Individual Tree Attributes. *Forests*, 8(2), 38. <https://doi.org/10.3390/f8020038>
 12. Qiu, Z., Feng, Z., Song, Y., Li, M., & Zhang, P. (2020). Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: Predicting forest vegetation growth based on climate and the environment. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119715>
 13. Stereńczak, K., Mielcarek, M., Wertz, B., Bronisz, K., Zajączkowski, G., Jagodziński, A. M., ..., & Skorupski, M. (2019). Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species. *Journal of Environmental Management*, 231, 1284–1292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.100>
 14. Vasagadekar, P. R., Gargate, A. V., Patil, Y. Y., & Raut, P. D. (2023). Carbon sequestration potential of trees from urban green spaces of Kolhapur city, Maharashtra, India. *Environmental & Socio-economic Studies*, 11(3), 22–32. <https://doi.org/10.2478/enviro-2023-0014>
 15. Wang, Y., Pyörälä, J., Liang, X., Lehtomäki, M., Kukko, A., Yu, X., ..., & Hyypä, J. (2019). In situ biomass estimation at tree and plot levels: What did data record and what did algorithms derive from terrestrial and aerial point clouds in boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111309. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111309>
 16. Williams, M. S., Bechtold, W. A., & LaBau, V. J. (1994). Five Instruments for Measuring Tree Height: An Evaluation. *Southern Journal of Applied Forestry*, 18(2), 76–82. <https://doi.org/10.1093/sjaf/18.2.76>
 17. Zhao, Q., Xu, D., Qian, W., Hu, R., Chen, X., Tang, H., & Zhang, C. (2020). Ecological and Landscape Perspectives on Urban Forest Planning and Construction: A Case Study in Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay Area of China. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, 44. <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00044>

A. M. Makarevych, A. M. Bilous

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

THE ACCURACY OF TREE HEIGHT MEASUREMENT USING DIFFERENT ALTIMETERS IN AN URBAN ENVIRONMENT

The paper presents the results of a study of the accuracy of tree height measurement in an urbanized environment. The possibilities of using altimeters to determine the height of trees in the urban environment are evaluated. The results of measuring the height of 299 trees of 28 tree species in green spaces of different landscapes were compared. The research was conducted on the territory of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, in areas of green spaces of limited use, such as educational buildings and student dormitories. In particular, the height of growing trees was estimated using four different instruments and five methods. They are as follows: a Blume-Leiss altimeter (Germany), Suunto PM-5 altimeter (Finland), Haglof EC II-D Electronic Clinometer (Sweden), and TruPulse 360B laser rangefinder (HD HT and VD modes) (USA). TruPulse 360B data (VD mode) was used as reference values for tree height. The results of the mathematical analysis showed satisfactory accuracy for altimeters and inclinometers. The corresponding value of the average random measurement error was less than 5 %. The systematic error is the smallest for the Haglof EC II-D electronic altimeter and is 0.001 m. The average random error in measuring the height of model trees is the smallest for Suunto PM-5 altimeters and is 3.9 %. Graphical analysis of deviations showed the accuracy and precision of trigonometric altimeters (Blume-Leiss, Suunto PM-5, Haglof EC II-D). The TruPulse 360B laser altimeter rangefinder in the "Vertical Distance" mode showed a systematic error of –0.673 m and an average random error of 8.7 %. Graphical analysis of the deviations showed an underestimation of the results with increasing tree height in this mode. Thus, this measurement method cannot be considered acceptable. The result is that trigonometric altimeters can be used to determine tree height in green spaces and are effective for urban forest inventory, forest management planning, and also silviculture and horticulture.

Keywords: green urban spaces; inventory; Suunto PM-5 Clinometer; Blume-Leiss Altimeter; Haglof EC II-D Electronic Clinometer; TruPulse 360B Laser Rangefinder.