

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ ДЕРЕВ РІЗНИМИ СПОСОБАМИ

А. М. БІЛОУС, доктор сільськогосподарських наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-7589-4307>, e-mail: bilous@nubip.edu.ua

П. П. ДЯЧУК, аспірант*

<https://orcid.org/0000-0003-2801-4556>, e-mail: diachuk@nubip.edu.ua

Р. М. ЗАДОРЖНЮК, аспірант*

e-mail: zadorozhniuk@nubip.edu.ua

М. С. МАЦАЛА, аспірант*

e-mail: matsala@nubip.edu.ua

М. М. БУР'ЯНЧУК, аспірант*

e-mail: mburianchuk@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Дослідження присвячено перевірці точності вимірювання висоти дерев різними способами. В роботі оцінено можливість використання стереофотограмметричного методу для визначення показників висоти дерев за допомогою знімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах стиглого соснового деревостану. Проведено порівняння результатів вимірювання висоти дерев сосни звичайної висотомірами та показників висоти, визначених за даними дистанційного зондування, отриманих за допомогою БПЛА. Загалом у дослідженні було розглянуто шість різних способів вимірювання висоти ростучих дерев. Дослідні дані про висоту модельних дерев збирали трьома різними висотомірами (ручними наземними приладами) та БПЛА Phantom 4 Pro. Застосування БПЛА полягало в оптичному зніманні та збиранні даних за допомогою бортового обладнання. Використано способи визначення висоти дерев, які спираються на результати оброблення даних, зібраних навісним обладнанням квадрокоптера. Зокрема, застосовано вимірювання висоти дерев із хмари точок, побудованої на основі одностороннього вертикального знімання модельних дерев, та розрахунок цифрової моделі висоти крон (СНМ) за даними аерофотознімання горизонтальних прольотів над деревостаном. Результати математичного аналізу проведених досліджень демонструють найвищу точність способу з використанням СНМ для визначення висоти ростучих дерев. Значення середньої випадкової помилки вимірювання висоти модельних дерев для СНМ становило менше ніж 2 %. Наступним за точністю визначення висоти дерев був спосіб вимірювання за допомогою лазерно-оптичного приладу TruPulse 360В, застосування якого продемонструвало найвищу точність з-поміж висотомірів. Використання TruPulse 360В для наземних вимірювань та способу СНМ (за даними оптичної зйомки з БПЛА) показало кращі результати, які відповідають нормативам точності визначення висоти для виробничої таксації. Способи визначення висоти дерев за даними оптичної зйомки з БПЛА можуть використовуватися для проведення обстежувальних, інвентар-

* Науковий керівник – доктор сільськогосподарських наук, професор А. М. Білоус.

ризаційних, лісовпорядних та інших робіт, які пов'язані із веденням лісового господарства та моніторингом змін у лісових екосистемах.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, аерофотознімання, стереофотограмметрія, модель висоти крон, висотомір.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Одним з основних таксаційних показників для визначення продуктивності лісів є середня висота деревостанів. Інструментальне вимірювання висоти дерев під час натурного обстеження лісового масиву є обов'язковим і потребує вимагає значних затрат часу та зусиль, особливо у складних за формою насадженнях із густим підліском та підростом. Ці та інші чинники впливають на точність виконання вимірювань, як на рівнинній місцевості, так і в гірських районах. Похибка вимірювання висоти дерев та розрахунок середньої висоти деревостану безпосередньо впливає на визначення таких показників, як бонітет, розряд висот, запас деревостану та його зміну.

Висотоміри за технологією вимірювання поділяють на три групи: тригонометричного й геометричного принципу дії та оптичні. Висотоміри тригонометричного принципу дії завжди базисні, тобто потребують фіксації на місцевості відстані від точки вимірювання висоти стовбура до дерева. При цьому висоту вимірюють за кутами візування на основу дерева та його верхівку. Геометричний принцип вимірювання висоти дерев ґрунтується на правилах подібності трикутників. Оптичні висотоміри побудовані на основі законів оптики (Myroniuk et al., 2019). Якщо немає коригування на ухил рельєфу місцевості, нахил дерева, форму крони, це може призводити до значних помилок у вимірюванні висоти ростучого дерева (Bragg, 2008).

Упродовж останніх десятиліть широко застосовують лазерно-оптичні

прилади, які призначені для вимірювання висоти дерева й базуються на використанні вбудованих елементів, зокрема інклінометра та лазерного далекоміра. Крім висоти можна проводити й інші вимірювання, що надає цим приладам переваги порівняно з іншими.

Із розвитком технологій з'явилися нові способи визначення параметрів ростучих дерев за даними дистанційного зондування землі (Forsman et al., 2016; Guimarães et al., 2020; Magnussen et al., 2016; Maselli et al., 2014; Mulla, 2013), які не потребують прямого вимірювання висоти.

Безпілотні літальні апарати широко використовують для оптичного знімання або лазерного сканування з метою збирання даних для вирішення локальних завдань у сільському (Eskandari et al., 2020) та лісовому господарстві (Guimarães et al., 2020). Удосконалення методів фотограмметрії та алгоритмів для оброблення зображень сприяє підвищенню точності побудови щільної хмари точок, яка є основою для створення цифрових моделей рельєфу та місцевості, а також 3D моделей просторових об'єктів. Як результат збільшується й точність результатів дешифрування об'єктів довкілля.

Сучасні вимоги суспільства до точності та актуальності інформації про лісові ресурси передбачають перегляд методів таксації лісу, що застосовують на практиці (Myroniuk et al., 2018), а впровадження дистанційного збирання даних у практику лісової інвентаризації є однією з основних сучасних тенденцій розвитку лісотаксаційних методів (Myroniuk et al., 2019). Саме тому актуальним є обґрунтування ефек-

тивності та точності визначення висоти дерев у лісових масивах із використанням даних дистанційного зондування Землі за допомогою БПЛА порівняно із застосуванням висотомірів.

Мета дослідження – перевірити у природних умовах різні способи і прилади вимірювання висоти дерев та встановити можливість використання методів стереофотограмметрії для визначення висоти дерев за даними оптичного знімання, зібраними за допомогою БПЛА.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводили на лісосіці головного користування в Іржавецькому лісництві Державного підприємства «Ніжинське лісове господарство» (30 квартал, 9 виділ) на території Чернігівської області.

Дослідження виконано у 80-річному насадженні I^a класу бонітету зі складом 7С3Дз та відносно повнотою 0,7, яке зростає в умовах свіжого грабово-дубово-соснового сугруду (С₂ГДС). Середній діаметр дослідного деревостану становив 44 см.

Об'єкт дослідження – точність вимірювання висоти дерев різними способами та приладами.

Дослідження проводили у три етапи. Перший етап передбачав відбирання 30 модельних дерев, присвоєння та нанесення унікальних ідентифікаційних номерів на їхніх стовбурах. Вимірювання висоти ростучих дерев виконували висотомірами *Suunto PM-5*, *Haglof EC II-D* та лазерним далекоміром-висотоміром *TruPulse 360B* відповідно до інструкцій із використання та проведення вимірювальних робіт (Laser Technology Inc., 2017).

Під час другого етапу використано БПЛА *Phantom 4 Pro* для виконання оптичного знімання. Дані дистанційного зондування Землі обробляли із використанням програмного забезпе-

чення (ПЗ) Agisoft Metashape (Agisoft Metashape, 2019).

Для безпосереднього визначення висоти дерев використано спосіб вимірювання висоти дерев та кущів за допомогою БПЛА (Bidolakh et al., 2018; Bidolakh et al., 2019). БПЛА встановлювали на рівні кореневої шийки ростучого дерева, що підлягало вимірюванню. Після цього літальний апарат у ручному режимі піднімали до верхівки дерева, центр прицілу його камери, відкалібрований паралельно до горизонту, наводили на найвищу точку дерева. За такої умови атрибутивні дані фотографії верхівки дерева містили просторову інформацію про координати та висоту, яку розраховували GPS-модулем автоматично (маркування способу – АМ) (Bidolakh et al., 2019).

Для використання методів фотограмметрії з метою створення просторових 3D моделей на основі фотографій виконували вертикальну рівновіддалену фотофіксацію всієї осі стовбура модельного дерева зі зніманням через рівні проміжки набору висоти БПЛА. Загалом для цього методу зроблено 1671 фотознімок та виконано 17 вертикальних підйомів для 30 модельних дерев. Це зумовлено груповим просторовим розміщенням деяких модельних дерев.

У результаті оброблення фотографій створювалася хмара точок модельного дерева чи куртини дерев (рис. 1) (Agisoft Metashape, 2019). Кожна з точок у такій хмарі мала відповідні просторові координати в заданій системі. Розрахована хмара точок містила у достатній мірі просторову інформацію, щоб відобразити ростуче дерево у 3D редакторі для визначення його висоти. У дослідженні використовували метричну систему координат WGS 84 / UTM зона 36N (EPSG::32636). Вимі-

рювання проводили за ручним задаванням початку та кінця відрізка інтересу за допомогою режиму лінійних вимірювань у ПЗ Agisoft Metashape. У ручному режимі підбирали найвищу точку крони відповідного модельного дерева, від якої визначали відстань до рівня кореневої шийки (маркування способу – РС).



Рис. 1. Вимірювання висоти із хмари точок (спосіб РС)

Додатково визначення висоти дерев здійснювали за моделлю висоти крон (спосіб *СНМ*), який передбачав отримання висоти за сукупністю операцій з оброблення аерофотознімків для одержання растрів цифрової моделі рельєфу (DEM) та місцевості (DSM), а також вирахування вихідного растру моделі висоти крон $СНМ = DSM - DEM$. Для створення цифрових моделей було виконано два горизонтальні прольоти над насадженням на висоті 70 і 90 метрів. У результаті одержано 251 аерофотознімок, на основі яких за допомогою ПЗ Agisoft Metashape було розраховано щільну хмару точок та проведено їхню класифікацію щодо належності землі чи деревам. Розрахований растр *СНМ* аналізували за допомогою пакета інструментів «Spatial Analyst» ПЗ ArcGIS з використанням фільтру «Focal statistics» для визначення висоти (Holiaka et al., 2018). На растр накладали координати модельних дерев, що їх визначали з матеріалів аерофотознімання шляхом візуальної ідентифікації індивідуального номера модельного дерева, нанесеного на стовбур. Відповідно до заданих координат зчитували значення висоти на растровому зображенні *СНМ*. З огляду на зміщення верхівки дерева від перпендикулярної осі росту, радіус пошуку максимальних значень було встановлено 0,75 м.

Третій етап дослідження полягав у контрольних вимірюваннях довжини стовбурів звалених 30 модельних дерев та висоти пнів із використанням лазерного далекоміра-кутоміра *South PD-520N* (табл. 1). Вимірювання діаметрів на висоті 1,3 м проводили за допомогою мірної вилки *Haglof «Mantax blue calipers»*. Сума довжини стовбура зрубаного дерева та висоти пня становила показник істинного значення висоти кожного модельного дерева окремо.

1. Розподіл модельних дерев за висотою та діаметром на висоті груди

Ступінь товщини, см	Висота, м							
	29	30	31	32	33	34	35	36
32			1					
36			1	1				
40	1	4	1	1			1	1
44		1			1	2		1
48					1	1	1	1
52			1	1			1	
56					1	1		
60				1		1	1	

Розподіл вимірних значень висоти модельних дерев за ступенями товщини (табл. 1) характеризується репрезентативним представленням модельних дерев на дослідному полігоні.

Загалом у процесі дослідження визначення показників висоти проводили шістьма різними способами для кожного із 30 модельних дерев сосни звичайної в ростучому стані та 30 істин-

них значень висоти кожної моделі після звалювання (табл. 2).

Результати дослідження та їх обговорення. Отримані за різними способами дані висоти для кожного з 30 модельних та їх істинні значення дерев наведено в табл. 2.

Результати статистичного оброблення даних (табл. 3) дають можливість оцінити переваги та недоліки викорис-

2. Результати вимірювань модельних дерев різними способами

№ модельного дерева	Діаметр, см	Спосіб вимірювання висоти ростучого дерева, м						Істинне значення висоти дерева, м
		<i>Haglof EC II-D</i>	<i>Suunto PM-5</i>	<i>TruPulse 360B</i>	<i>AM</i>	<i>PC</i>	<i>СНМ</i>	
1	48,4	33,00	31,00	30,20	33,50	34,27	32,46	33,06
2	40,4	31,40	32,50	31,30	33,70	33,43	32,56	32,43
3	41,1	26,10	27,00	26,80	31,80	32,83	29,72	29,59
4	48,9	34,40	35,00	33,00	34,60	34,79	33,18	34,09
5	58,3	33,30	36,60	32,60	35,60	35,93	34,33	34,35
6	53,0	34,20	32,60	33,50	36,80	36,46	34,58	33,47
7	44,2	31,30	30,40	32,50	36,30	35,85	32,52	33,22
8	38,0	27,90	26,50	28,50	32,10	31,69	29,79	30,73
9	34,7	30,70	26,50	30,70	33,20	33,07	31,13	32,37
10	46,0	31,70	32,00	32,60	34,80	34,64	31,53	33,81
11	56,2	36,20	35,50	33,70	38,00	37,13	34,71	35,22
12	52,9	32,80	32,00	33,50	36,80	36,04	33,94	34,45
13	38,4	31,30	29,50	28,20	28,90	31,79	29,96	30,48
14	51,1	29,60	28,60	29,20	30,70	31,11	29,53	30,50
15	59,2	32,20	32,50	31,40	34,10	34,30	31,76	32,33
16	42,4	29,20	29,50	28,80	33,30	31,12	29,89	29,67
17	38,2	30,40	31,50	28,40	27,60	28,05	27,97	28,71
18	39,8	29,50	27,80	29,30	31,60	30,06	29,61	29,73
19	39,1	33,40	33,00	31,00	32,30	29,39	30,00	30,45

№ модельного дерева	Діаметр, см	Спосіб вимірювання висоти ростучого дерева, м						Істинне значення висоти дерева, м
		<i>Haglof EC II-D</i>	<i>Suunto PM-5</i>	<i>TruPulse 360B</i>	<i>AM</i>	<i>PC</i>	<i>CHM</i>	
20	51,9	32,10	31,50	34,30	35,50	35,13	34,03	34,88
21	44,8	33,80	33,50	34,80	37,80	34,85	34,51	35,60
22	32,9	30,40	30,50	30,40	35,70	30,20	30,79	31,32
23	48,9	37,50	37,50	35,40	38,40	35,65	35,15	36,33
24	49,8	35,10	35,50	34,60	37,30	34,27	34,43	34,70
25	39,5	35,00	34,50	34,50	39,30	37,38	34,99	35,90
26	57,8	38,10	38,50	36,90	40,20	38,85	36,31	35,48
27	45,7	34,90	35,50	32,00	35,70	33,17	33,52	33,70
28	41,5	34,30	34,30	32,80	38,00	34,46	34,56	35,30
29	40,0	29,90	29,20	28,70	31,70	31,30	30,13	30,23
30	53,9	32,20	33,50	30,90	33,90	33,79	31,34	31,98

3. Результати статистичного оброблення отриманих значень висоти дерев

Статистичні показники	Спосіб визначення висоти дерев					
	<i>Haglof EC II-D</i>	<i>Suunto PM-5</i>	<i>TruPulse 360B</i>	<i>AM</i>	<i>PC</i>	<i>CHM</i>
Середнє арифметичне значення	32,40	32,13	31,68	34,64	33,70	32,30
Середнє квадратичне відхилення	2,73	3,21	2,51	3,02	2,56	2,22
Стандартна похибка	0,50	0,59	0,46	0,55	0,47	0,40
Коефіцієнт мінливості, %	8,42	9,98	7,91	8,73	7,59	6,86
Похибка вимірювання	-0,41	-0,67	-1,12	1,84	0,90	-0,51
Систематична помилка, м	69,60	133,67	25,28	58,04	47,16	11,96
Середня випадкова помилка вимірювання	1,45	2,01	0,88	1,41	1,28	0,64

тання різних способів вимірювання ростучих дерев, що були використані в цьому дослідженні. Найбільшу похибку вимірювання було встановлено для способу *AM* – 1,84, найнижча становила 0,41 для *Haglof EC II-D*. Систематична помилка вимірювання найбільшою виявилася для *Suunto PM-5* – 133,67 м, а найменшою – 11,96 м для *CHM*. Середня випадкова помилка, відповідно, найбільшою виявилася для *Suunto PM-5* – 2,01 та найнижчою – 0,64 для *CHM*.

Результати, отримані у цьому дослідженні, а також дані досліджень (Bidolakh et al., 2018; Bidolakh et al., 2019), додатково підтвердили дослідження (Williams et al., 1994) про най-

вищу точність ручних лазерних вимірювальних приладів.

Похибка вимірювань лазерними приладами пов'язана з перешкодою бокових гілок у процесі прицілювання лазера на вершину модельного дерева, що особливо спостерігається за умов росту та розвитку негустого дерево-стану. Деревя в таких насадженнях стиглого та перестійного віку мають широку шатровидну крону, де найвища точка верхівки дерева не завжди розташовується в центрі крони та зумовлює недооцінку висоти (рис. 1).

Проблему заниження показників висоти за вимірювання лазерними висотомірами, притаманну *TruPulse 360B*, проілюстровано на рис. 2, де показни-

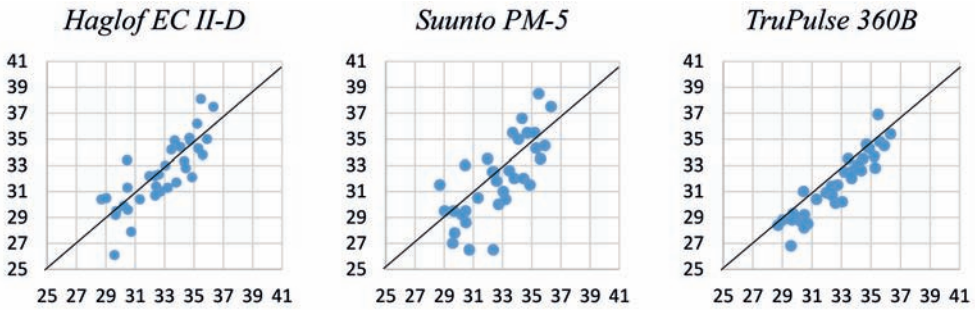


Рис. 2. Порівняння результатів вимірювання висоти дерев висотомірами

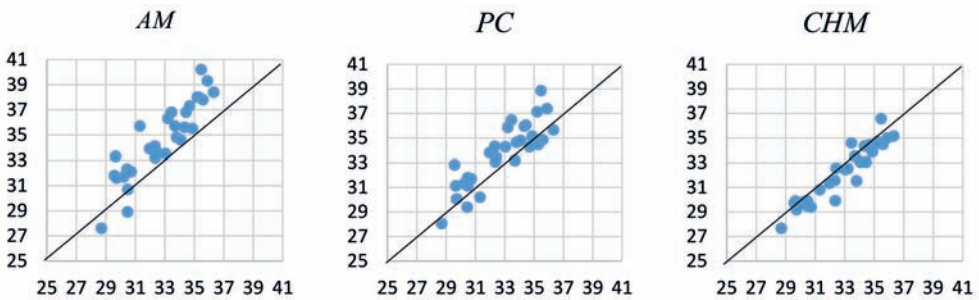


Рис. 3. Порівняння визначення висоти за допомогою БПЛА

ки висоти основної кількості модельних дерев мають занижені значення.

Застосування оптичного висотоміра *Suunto PM-5* передбачає використання двох базисних відстаней (15 та 20 м) і характеризується непрецензійністю показників висот модельних дерев. Специфіка застосування тригонометричного висотоміра *Haglof EC II-D* порівняно з *Suunto PM-5* має перевагу завдяки можливості довільної зміни базисної відстані, що підвищує точність вимірювань. Збільшення базисної відстані для *Haglof EC II-D* може зумовлювати погіршення видимості верхівки модельних дерев та зростання затрат часу на пошук задовільного місця для візування. Найчастіше проблеми із візуванням верхівки дерева виникають в умовах густого деревостану та перетяготи місцевості.

Обговорюючи точність способів вимірювання висоти дерев за допомогою

БПЛА та переваги використання *SHM* для деревостанів, потрібно зауважити про існування значної кількості методичних підходів до визначення та уточнення параметрів ростучих дерев, які наведено в роботах (Guimarães et al., 2020) та (Sadeghi & Sohrabi, 2019).

Порівнюючи точність способів визначення висоти за допомогою БПЛА (рис. 3), потрібно звернути увагу, що для створення *SHM* потрібні найменші затрати часу для збирання даних у польових умовах.

Додатковою перевагою для *SHM* є те, що немає потреби у висококваліфікаційних навичках оператора БПЛА для пілотування під пологом деревостану, на відміну від способу *AM* (Bidolakh et al., 2018) та створення хмари точок ростучого дерева за способом *PC*. Також слабким місцем використання дистанційних методів із використанням БПЛА в соснових де-

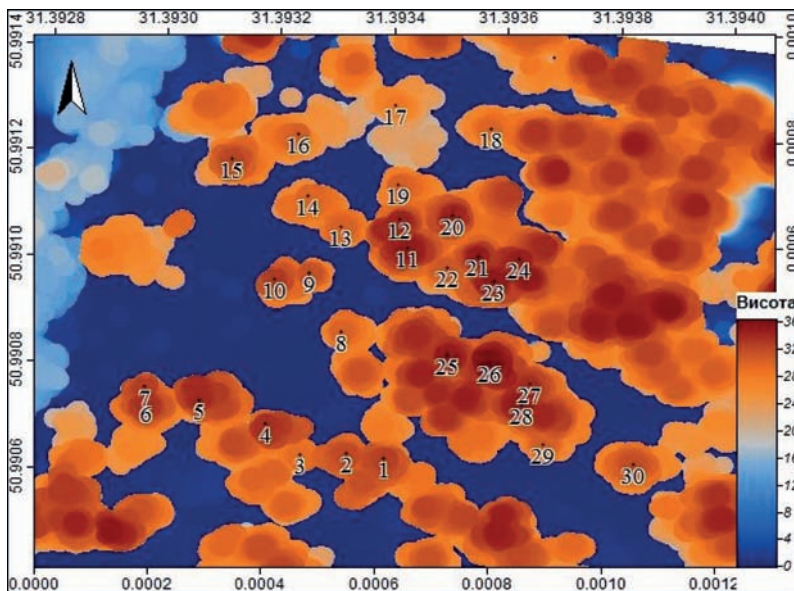


Рис. 4. *СНМ* після використання інструментів «Focal statistics»

ревостанах є їхня залежність від коректності визначення географічно-просторових координат GPS-модулем, через перешкоджання проходженню сигналу через полог лісу. Унаслідок нестабільного сигналу збільшуються затрати часу на уточнення координат та постійне їх коригування, що записується в метадані фотографій. Специфіка соснового деревостану могла зумовити збільшення похибок та відхилень порівняно з даними для букового деревостану (Bidolakh et al., 2019). Зокрема, середня випадкова помилка у процесі досліджень точності вимірювань становила 0,72, а систематична – 15,03 м для дерев бука лісового (*Fagus sylvatica L.*) у листяному насадженні зі складом 10 Бкл та повнотою 0,4 (Bidolakh et al., 2019), а для дерев сосни звичайної (*Pinus sylvestris L.*) у дослідному деревостані середня випадкова помилка вимірювань склала 1,41, а систематична помилка 58,04 м (табл. 1).

На рис. 4 відображено номери та просторове розташування модельних

дерев на дослідній ділянці відповідно до встановлених координат. Додатково на рис. 4 нанесено координатну сітку, легенду (шкалу) значень висоти з градацією за кольорами.

Результати визначення висот із растрового зображення *СНМ* після використання фільтру «Focal statistics» (рис. 4) порівнювали з іншими способами визначення висоти за матеріалами аерофотознімання (рис. 3). Отримані значення характеризуються значним завищенням показників висоти для способів *AM* та *PC*. Показники висоти за способом *СНМ* мають найменші відхилення та розміщуються згруповано щодо істинних значень висоти модельних дерев.

Найбільш точним з-поміж усіх розглянутих у дослідженні способів вимірювання ростучих дерев виявився *СНМ*. Лазерно-оптичний прилад *TruPulse 360B* був найточнішим серед ручних наземних висотомірів. Середня випадкова похибка вимірювань для *TruPulse 360B* склала 0,88, а для

$СНМ = 0,64$. Насамперед це пояснюється незалежністю $СНМ$ від дій оператора, тобто мінімується людський фактор у проведенні вимірювань.

Перевагою наземних ручних висотомірів є можливість оперативного отримання значення висоти вимірюваного дерева на місці. Використання оптичного знімання за допомогою БПЛА потребує часу на проведення оброблення та аналізу вихідних даних за допомогою спеціалізованого ПЗ. З іншого боку, за потреби встановлення висоти для значної кількості дерев у насадженні, використання методів стереофотограмметрії характеризується суттєвими перевагами, зокрема, меншими затратами часу на польові роботи, наявністю інформації про висоту всіх ідентифікованих дерев, різноплановими можливостями в роботі з отриманими результатами; обмеженням зони інтересу (полігону, виділу), у якому автоматично встановлюються та моделюються таксаційні показники. Також у процесі оброблення матеріалів аерофотознімання одержують цифрову модель рельєфу, яку в подальшому може бути використано при створенні схеми розробки лісосіки. Окрім того, застосування БПЛА для визначення висоти дерев залишає архів записів процесу вимірювання, що може бути додатковим інструментом для контролю якості лісотаксаційних робіт.

Висновки та перспективи. Порівняння різних способів дало змогу оцінити точність вимірювань та встановити переваги й недоліки приладів для

вимірювання висоти, які активно використовують на території України. Можливості БПЛА для вимірювання висоти показують переваги та перспективність застосування оптичного знімання за допомогою БПЛА для отримання даних під час проведення інвентаризаційних, лісовпорядних та обстежуваних робіт у лісових масивах.

Аналіз результатів використання способу $СНМ$ показав найменший вплив людського фактора на результати, оскільки вимірювання висоти дерев проводиться з мінімальною участю оператора, що важливо для контролю якості виконання господарських заходів та їх проектування.

Значення середньої випадкової похибки для $СНМ$ становило менше ніж 2 %, що дає змогу визначати висоти дерев у соснових деревостанах із високою точністю й задовольняє вимоги за виробничої таксацією згідно з «Інструкцією з впорядкування лісового фонду України» (2014).

Додаткового вивчення потребує оцінка впливу якості сигналів від систем супутникового позиціонування, під пологом лісу, на точність визначення висоти дерев за допомогою бортового оснащення БПЛА у хвойних деревостанах порівняно з листяними.

Накопичення растрових даних надвисокої роздільної здатності, отриманих за допомогою БПЛА, дає змогу збільшити можливості моніторингу лісових насаджень та виявити зміни в їхній структурі на локальному рівні (лісовий масив, квартал, таксаційний виділ).

Список літератури

- Agisoft Metashape, A. M. U. (2019). *Agisoft Metashape User Manual – Professional Edition, Version 1.5*, 145.
- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuzyovych, 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 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/40280104>
- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuzyovych, 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 [in Ukrainian].

- nian]. <https://doi.org/10.31548/forest2019.03.019>
- Bragg, D. C. (2008). An improved tree height measurement technique tested on mature southern pines. *Southern Journal of Applied Forestry*, 32 (1), 38–43.
- Eskandari, R., Mahdianpari, M., Mohammadianesh, F., Salehi, B., Brisco, B., & Homayouni, S. (2020). Meta-analysis of Unmanned Aerial Vehicle Imagery for Agro-environmental Monitoring Using Machine Learning and Statistical Models. *Remote Sensing*, 12 (21), 3511. <https://doi.org/10.3390/rs12213511>
- Forsman, M., Börlin, N., & Holmgren, J. (2016). Estimation of Tree Stem Attributes Using Terrestrial Photogrammetry with a Camera Rig. *Forests*, 7 (12), 61. <https://doi.org/10.3390/f7030061>
- Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities. *Remote Sensing*, 12 (6), 1046. <https://doi.org/10.3390/rs12061046>
- Holiaka, D., Kato, H., Yoschenko, V. I., Igarashi, Ya., Onda, Yu., Avramchuk, O. O., Holiaka, M. A., Humenyuk, V. V., & Lesnyk, O. M. (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 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/40281003>
- Instructions for arranging the forest fund of Ukraine, (2014) [in Ukrainian]. Available at http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=119314.
- Laser Technology Inc. (2017). *LTI TruPulse 360/360B User's Manual*. 57.
- Magnussen, S., Næsset, E., Kändler, G., Adler, P., Renaud, J. P., & Gobakken, T. (2016). A functional regression model for inventories supported by aerial laser scanner data or photogrammetric point clouds. *Remote Sensing of Environment*, 184, 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.035>
- Maselli, F., Chiesi, M., Mura, M., Marchetti, M., Corona, P., & Chirici, G. (2014). Combination of optical and LiDAR satellite imagery with forest inventory data to improve wall-to-wall assessment of growing stock in Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.001>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114 (4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemeng.2012.08.009>
- Myroniuk, V., Bilous, A., Diachuk, P., & Fedyna, K. (2018). Accuracy of sample-based forest inventory obtained from different plot configurations. *Biological Resources and Nature Management*, 10 (5–6) [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31548/bio2018.05.018>
- Myroniuk, V. V., Svychnyk, V. A., Bilous, A. M., & Vasylyshyn, R. D. (2019). *Forest mensuration: Tutorial*. Kyiv, NUBiP of Ukraine [in Ukrainian]
- Myroniuk, V., Bilous, A., & Diachuk, P. (2019). Predicting forest stand parameters using the k-NN approach. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 10 (2), 51–63 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31548/forest2019.02.051>
- Sadeghi, S., & Sohrabi, H. (2019). *The effect of UAV flight altitude on the accuracy of individual tree height extraction in a broad-leaved forest. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, GeoSpatial Conference 2019 – Joint Conferences of SMPR and GI Research, 12–14 October 2019, Karaj, Iran*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w18-1168-2019>
- 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>

**Bilous A. M., Diachuk P. P., Zadorozhniuk R. M.,
Matsala M. S., Burianchuk M. M.**

ACCURACY OF SELECTED METHODS OF MEASUREMENT OF TREE HEIGHTS

In this paper, the possibilities of using stereophotogrammetry methods for measurements using unmanned aerial vehicles (UAVs) for the conditions of a mature pine stand with uneven density are examined. Here, we carried out a comparison of measurements using altimeters and remote sensing data collected with a UAV optical camera. In particular, the height of growing trees was estimated by three different field-based devices and applying the three methods of data collection and processing

with UAVs. Specifically, one method implied the direct measurements using on-board UAV equipment. The following two methods are based on the data provided by the stereophotogrammetrical approach, while the aerial images for that were collected using a UAV optical camera. In particular, there was a modeling of the points cloud from one-sided vertical shooting of sample trees and determination of height of trees from digital canopy height model (CHM) from data of aerial photography of horizontal spans over a stand. Our investigation confirmed the highest accuracy of laser measuring tools among the ground measuring devices used in research. Respective value of the average random measurement error was less than 3 % (0.88 m). Among the results obtained from the analysis of the original data collected by UAVs, the best method was to utilize the CHM, namely, the average random error was less than 2% (0.64 m). This exceeds the accuracy of laser altimeter measurements 33 %. Thus, this method of measuring height in pine stands meets the standards of accuracy in determining the height for production assessment, according to the "Inventory guidelines for the forest fund of Ukraine", and can be used for survey, inventory, forest management and other works related to forestry and monitoring the changes in forest ecosystems.

Keywords: UAV, CHM, stereophotogrammetry, points cloud.

Отримано: 2021-02-19