ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ДЕРЕВ ЗА ДАНИМИ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ РІЗНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

П. П. ДЯЧУК, аспірант*

Національний університет біоресурсів і природокористування України
<https://orcid.org/0000-0003-2801-4546>, e-mail: diachuk@nubip.edu.ua

Збирання інформації про ріст і розвиток дерев є основою для планування господарських заходів у лісовому та садово-парковому господарстві, актуальність і достовірність таких даних дає змогу ефективно провести лісо- та парко-інвентаризаційні роботи. На сьогодні в Україні вимірювання висоти ростучих дерев та чагарників у більшості випадків здійснюється висотомірами. Розвиток технологій використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та методів оброблення зібраної інформації дає змогу перейти на інший рівень якості та точності зібраної інформації.

Метою дослідження було розглянути можливості визначення висоти дерев за матеріалами аерофотозйомки, отриманими за допомогою БПЛА, та оцінити точність отриманих показників із моделей висоти крон (СНМ) різної роздільної здатності.

Використано методи створення цифрової моделі висоти крон з аерофотознімків, отриманих за допомогою БПЛА. Створено вісім цифрових моделей рельєфу та місцевості для розрахунків СНМ. Аналіз растрових зображень було виконано за допомогою програмного забезпечення ArcGIS пакета інструментів «Spatial Analyst» із використанням фільтра «Focal statistics». Встановлені значення висоти дерев порівнювали з реальними показниками, які одержано способом прямого вимірювання звалених модельних дерев із додаванням висоти пня.

Відображено чотири з восьми розрахованих СНМ із накладанням модельних дерев у системі координат WGS 84 / UTM зона 36N (EPSG::32636). Описано зміну таксаційних показників висоти дерев сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та можливість їх ідентифікації у насадженні за допомогою СНМ різної роздільної здатності. Проаналізовано показники висоти для модельних дерев, які отримані з СНМ різної роздільної здатності. В результаті чого встановлено, що растри з роздільною здатністю 0,04 м/пікс та 0,1 м/пікс мають найменші відхилення показників висоти у деревостані порівняно з фактичними значеннями. Відносні відхилення середніх арифметичних висоти дерев на цих растрах становили 2,3 % та 2,6 %.

Растрові зображення з роздільністю понад 0,3 м/пікс не дають змоги ідентифікувати верхівку дерева, також збільшується значення похибки у визначенні висоти дерев. У цьому досліді для растрового зображення СНМ із роздільною здатністю в 1 м/пікс похибка вимірювання становила понад 17 %, і вона зростає зі зниженням роздільної здатності, що перевищує допустимі відхилення для визначення висоти дерев згідно з чинними інструкціями з упорядкування лісового фонду в Україні.

Ключові слова: модель висоти крон, цифрова модель місцевості, цифрова модель рельєфу, безпілотний літальний апарат, сосна звичайна, хмара точок.

Актуальність. Сучасні вимоги суспільства до точності та актуальності інформації про лісові ресурси потребують перегляду методів таксації лісу, що застосовують на практиці. У системі лісоупорядкування нашої країни переважно

використовують окомірний метод, точність якого складно піддається кількісній оцінці. Удосконалення методів обліку лісових ресурсів можливе тільки з використанням об'єктивних даних лісової інвентаризації, точність яких відома та

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

планується заздалегідь (Myroniuk et al., 2018). Упровадження дистанційного збору даних у практику лісової інвентаризації є однією з основних сучасних тенденцій розвитку лісооблікових методів. Дистанційні технології дали змогу зменшити витрати на проведення польових робіт і додали статистичним оцінкам просторову складову у вигляді карт, що відображають видовий склад лісів і розподіл окремих біофізичних параметрів деревостанів (сума площ перерізів, запас і біомаса) (Myroniuk et al., 2019).

Розвиток безпілотних авіаційних систем і сенсорів збирання даних робить їх застосування доступнішим і відкриває нові перспективи для використання. У поєднанні з розвитком програмного забезпечення (ПЗ), вдосконалюються методи та алгоритми оброблення, що підвищують якість зібраних даних про ліс (Litkey et al., 2004; H. Liu, & Dong, 2014; L. Liu et al., 2019). Дослідження таксаційних показників про ліси пов'язане не тільки з потребою у економічному аналізі лісового господарства, а й із проблемами збереження біорізноманіття та вразливістю лісових екосистем в умовах змін клімату. Найбільш перспективним підходом для оцінювання таксаційної характеристики лісу залишається лазерне сканування, однак обладнання невеликих розмірів, яке придатне для використання на БПЛА, є дорогим і обмежуються декількома виробництвами (Frey et al., 2018), а застосування оптичних сенсорів є найбільш поширеним у сучасних умовах.

Нині у лісовій таксації використовують багато методів вибіркового вимірювань, які мають відмінності в теоретичній основі, методиці польових робіт, а також технології оброблення результатів. В умовах, коли в Україні широко обговорюють доцільність запровадження національної лісової інвентаризації на статистичній основі, науковий аналіз різних підходів щодо вибіркової таксації лісу є

особливо актуальним (Myroniuk et al., 2018). У зв'язку з цим, у роботі проведено порівняння результатів визначення висоти за растровими зображеннями різної роздільної здатності, що отримані в результаті оброблення даних, зібраних за допомогою БПЛА, як можливої складової процесу виконання лісоінвентаризаційних робіт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Висота деревних і чагарникових рослин є важливим таксаційним показником, який використовують для визначення об'єму стовбурів, запасу деревостану, бонітету, приросту та аналізу росту насаджень (Bidolakh et al., 2019). Вимірювання висоти дерев висотомірами проводять із використанням ручних вимірювальних приладів, робота яких побудована на класичних принципах геометрії, тригонометрії та оптики. З розвитком техніки для вимірювання висоти почали використовувати ультразвукові та лазерні прилади, що підвищило точність вимірювань та зменшило затрати часу.

На сьогодні поєднання оптичних і лазерних технологій для вимірювань має широке використання у дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ), і це стосується не лише супутників на орбіті, а й сенсорів для БПЛА. У дослідженнях (Guimarães et al., 2020) наведено переваги, які роблять БПЛА одним із найкращих варіантів для збирання даних ДЗЗ у процесі управління лісовими ресурсами.

Дистанційне зондування Землі за останні кілька десятиліть було одним із найпривабливіших напрямів досліджень. За допомогою відбитої та випромінюваної енергії методи ДЗЗ вимірюють різні фізичні властивості земної поверхні (Joseph, 2011; Roy et al., 2017). Значний поштовх для удосконалення методів оброблення даних ДЗЗ отримало з розвитком геоінформаційних і глобальних навігаційних супутникових систем, що

додатково вплинуло на можливості його використання (Emery, & Camps, 2017).

Використання БПЛА та оптичних сенсорів дає змогу отримувати зображення надвисокої роздільної здатності, які поєднуються з даними географічно-просторового розміщення сенсора під час зйомки. За допомогою комп'ютерного стереобачення (Computer stereo vision), порівнюючи два або більше зображень об'єкта, можна отримати 3D інформацію про нього.

У результаті оброблення методами стереофотограмметрії розраховують хмару точок та похідні 3D моделі, які можна використати для автоматичного визначення та картографування таксаційних показників деревостану, зокрема висоти як ключового показника. Хмара точок є основою для створення цифрової моделі висоти пологів лісу, з якої за допомогою алгоритмів фільтрації максимальних значень та плаваючих функцій можна ідентифікувати дерево в насадженні та встановити його висоту. Тим не менш, такий підхід має недоліки, зокрема, помилки у детектуванні низьких дерев під пологом лісу та помилкове виділення верхівок дерев, що розташовані в межах радіуса фільтрації (Holiaka et al., 2018). Частково це можна вирішити завдяки комплексному використанню точкових хмар під час літніх і зимових обстежень за незаочної обробки СНМ у лісових насадженнях із різною густотою (Medvedev et al., 2020).

У лісовій практиці для вимірювання висоти дерев усе частіше починають використовувати методи, які базуються на використанні тривимірного моделювання, ортофото, цифрової моделі місцевості (DSM), цифрової моделі рельєфу (DEM) та хмари точок (Wada, 2017). СНМ, яке будується на різниці між DEM і DSM, широко використовують для оцінювання продуктивності надземної фітомаси (Forsman et al., 2016). У сільському господарстві за допомогою растрових

зображень СНМ оцінюють біомасу зернових культур. Отримання показників висоти рослин та їх приросту має важливе значення для точного землеробства, керування внесенням добрив та прогнозування врожайності (Fengabed et al., 2018).

У дослідженнях лісових масивів на радіоактивно забруднених територіях СНМ використовують для ідентифікації та вимірювання висоти деревостанів (D. Holiaka et al., 2018), що дасть змогу в подальшому уникнути додаткового опромінення таксаторів, під час проведення лісовпорядних робіт на території ДСП «Північна пуща», Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника та інших частин лісового фонду України, які зазнали радіаційного забруднення. Також у дослідженні (D. Holiaka et al., 2018) наголошується на вимірюванні верхньої висоти деревостану, яка має важливіше значення ніж середня висота (Strochinskiy, 1992).

Існує спосіб визначення висоти дерева за допомогою бортового оснащення БПЛА, яке дає змогу проводити пряме вимірювання висоти. Таке застосування допомагає отримати оперативну інформацію безпосередньо в польових умовах та не потребує спеціалізованого ПЗ для оброблення даних (Bidolakh et al., 2018).

Використання БПЛА в лісовому господарстві України спрямоване на патрулювання територій підприємства для виявлення порушень у використанні лісових ресурсів, локалізації та оперативного керування під час гасіння лісових пожеж та спостереження за тваринами. Таксація запасу деревини насаджень за допомогою БПЛА наразі не має широкого використання.

Мета дослідження – встановити можливість визначення висоти дерев зі зменшенням роздільної здатності СНМ, сформованих на основі щільної хмари точок для соснових деревостанів неоднорідної густоти.

Матеріали і методи дослідження. Матеріали дослідження зібрані під час польових досліджень у ДП «Ніжинське лісове господарство» на території Іржавецького лісництва (30 квартал, 9 виділ) Чернігівської області (N50°59'24,0187 E31°23'34,6489).

Об'єкт дослідження – висота дерев сосни звичайної у деревостані неоднорідної густоти. Контрольне вимірювання модельних дерев проводили після звалювання за допомогою мірної стрічки та лазерно-оптичного вимірювального приладу PD-520N. Діаметри були виміряні мірною вилкою «Mantax Precision Blue» (Haglof, Швеція).

Аерофотозйомку лісового масиву проводили БПЛА Phantom 4 Pro базової комплектації. Виконано два полігональні прольоти з перекриттям знімків 80 % за допомогою ПЗ Pix4Dcapture. Відзнято 81 сцену, серед яких 24 з висоти 70 метрів і 57 із 90 метрів.

Для оброблення фотоматеріалів було використано ПЗ Agisoft Metashape, де було проведено вирівнювання фотографій, створення щільної хмари точок та їх класифікації. Створено цифрову модель рельєфу та цифрові моделі місцевості, з різниці яких було визначено модель висоти крон для растрових зображень різної роздільної здатності.

Одержані растри зберігали у форматі TIFF із системою координат WGS 84 / UTM зона 36N (EPSG::32636).

Максимальні значення висоти дерев визначали за допомогою ПЗ ArcGIS, пакета інструментів «Spatial Analyst» із використанням фільтра «Focal statistics» (D. Holiaka et al., 2018). Встановлено координати верхівок дерев із радіусом пошуку максимальних значень 0,75 м на вихідному растрі СНМ із максимально доступною роздільною здатністю 0,04 м/пікс. Отримані координати накладали на інші растрові зображення СНМ та читували атрибутивну інформацію про висоту для модельного дерева. Наданий

унікальний номер дерев було нанесено на їхню кору у такий спосіб, щоб він зчитувався на аерофотознімках.

Для розуміння та спрощення сприйняття рисунків СНМ на них було нанесено координатну сітку зверху та по лівому краю, номери модельних дерев згідно з їх розташуванням на дослідній ділянці, умовну позначку з підписом «Н, м», яка відображає розраховане значення висоти.

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті оброблення 81 аерофотознімка було розпізнано близько 774 900 сполучних точок, на основі яких збудовано щільну хмару з понад 28,5 млн точок. Створено вісім моделей DEM і вісім моделей DSM, розраховано вісім СНМ, чотири з них, найбільш репрезентативні, подано на рис. 1–4, де, зокрема, відображено фактичне розміщення верхівок модельних дерев на дослідній ділянці та винесено їхні порядкові номери.

Аналіз СНМ із роздільною здатністю 0,04 м/пікс (рис. 1), за допомогою ПЗ ArcGIS (пакета інструментів «Spatial Analyst») з використанням фільтра «Focal statistics», відображає найменші втрати показника висоти модельних дерев у насадженні. Відносне відхилення для середнього арифметичного значення висоти дерев становило 2,3 %. Аналогічний показник, розрахований для СНМ із роздільністю 0,1 м/пікс, на 0,3 % перевищує попередній показник.

Растрові зображення СНМ із роздільною здатністю понад 1 м/пікс (рисунки 3 і 4) неефективні для використання, оскільки спричиняють похибку вимірювання понад 10 %, що перевищує допустимі відхилення у визначенні таксаційних показників згідно з «Інструкцією зі впорядкування лісового фонду України» (Instructions for arranging, 2014). Втрачається можливість ідентифікації дерева та його верхівки стереофотограмметричними методами.

Рис. 1. CHM із роздільною здатністю 0,04 м/пікс

Рис. 2. CHM із роздільною здатністю 0.3 м/пікс

Побудова контуру крони залишається доступною з роздільною здатністю до 0,3 м/пікс, це необхідно для визначення зімкнутості намету дерево-стану. Аналіз отриманих значень висоти

дерев підтверджує систематичний характер відхилень у визначенні показників, що наголошується для даних, зібраних за допомогою БПЛА у цьому дослідженні (Bidolah et al., 2020).

Рис. 3. СМН із роздільною здатністю 5 м/пікс

Рис. 4. СМН із роздільною здатністю 10 м/пікс

Загалом було вираховано 240 значень висот модельних дерев (табл. 1) із растрових зображень СМН роздільної здатності від 4 см/пікс до 30 м/пікс. Діаметри на висоті грудей та істинні значення

висоти дерев були отримані наземними вимірюваннями під час польових робіт.

Аналіз одержаних результатів (табл. 2) відображає зменшення середнього арифметичного значення висоти модельних

1. Дані висоти модельних дерев на СНМ різної роздільної здатності

№ модельного дерева	Діаметр, см	Роздільна здатність растрового зображення СНМ								Істинне значення висоти дерева, м
		4 см/пікс	10 см/пікс	30 см/пікс	1 м/пікс	3 м/пікс	5 м/пікс	10 м/пікс	30 м/пікс	
1	48	32,06	32,05	31,88	30,01	16,62	10,47	6,93	7,97	33,06
2	40	31,57	31,56	31,29	29,72	17,63	9,46	7,14	7,57	32,43
3	41	28,72	28,72	28,64	25,55	15,93	7,91	9,54	6,85	29,59
4	48	33,04	32,98	23,45	15,71	12,17	11,35	9,00	6,77	34,09
5	58	33,51	33,47	33,06	31,92	21,10	11,41	7,54	5,85	34,35
6	53	32,93	32,92	31,47	27,85	17,95	12,00	5,90	4,83	33,47
7	44	32,33	32,28	26,90	17,50	7,75	8,28	4,62	4,84	33,22
8	38	29,69	29,71	28,91	22,95	7,32	4,63	4,73	8,72	30,73
9	34	31,11	29,63	26,42	16,71	7,21	3,85	3,50	9,13	32,37
10	46	32,30	32,28	26,88	19,63	10,64	6,32	2,23	8,85	33,81
11	56	34,54	34,53	34,30	33,73	24,86	20,89	12,37	9,49	35,22
12	52	33,87	33,82	33,10	28,03	18,38	19,03	9,86	9,49	34,45
13	38	29,90	29,88	29,68	23,98	7,82	6,27	5,63	9,49	30,48
14	51	29,51	29,16	26,94	19,06	10,23	10,04	4,83	9,49	30,50
15	59	31,72	31,70	31,29	27,81	14,77	12,35	6,05	9,49	32,33
16	42	30,06	30,02	27,22	22,93	18,92	9,70	7,07	9,49	29,67
17	38	27,83	27,78	27,29	25,72	14,04	10,47	3,91	9,49	28,71
18	39	29,48	29,47	29,05	28,21	15,36	13,60	8,53	9,49	29,73
19	39	29,82	29,81	28,92	23,21	11,48	8,55	7,42	9,49	30,45
20	51	33,94	33,93	33,50	32,03	23,57	17,25	12,72	9,49	34,88
21	44	34,73	34,63	33,75	32,31	16,47	17,66	15,64	9,47	35,60
22	32	30,61	30,60	30,35	27,56	18,97	14,76	14,66	9,42	31,32
23	48	34,74	34,75	34,53	32,67	25,70	18,28	14,81	9,38	36,33
24	49	33,96	33,95	30,17	24,93	17,95	17,90	15,27	9,45	34,70
25	39	34,66	34,63	34,22	32,36	22,19	18,81	14,65	9,10	35,90
26	57	36,04	36,02	35,71	33,19	25,08	18,69	14,28	9,08	35,48
27	45	32,98	32,93	32,55	31,87	25,88	20,96	15,27	8,99	33,70
28	41	34,35	34,31	34,14	33,36	28,30	24,83	16,17	8,93	35,30
29	40	30,10	30,07	29,81	26,69	13,33	10,40	8,82	8,70	30,23
30	53	31,20	31,20	31,09	30,54	18,05	7,89	5,63	8,03	31,98

дерев. Відповідно зростають похибки вимірювань, які характеризуються значною недооцінкою висоти дерев. Така тенденція зберігається для кожного наступного растрового зображення зі зменшенням роздільної здатності (рис. 5), основою яких є одна й та сама щільна хмара точок.

Середнє арифметичне при аналізі істинних значень висоти для 30 модельних

дерев склало 32,8 м, найближчими до нього є значення 32,04 м (табл. 2, рис. 5) яке отримано із растрового зображення з роздільною здатністю 4 см/пікс та 31,96 м для растра – 10 см/пікс (табл. 2, рис. 5).

Характерним для всіх моделей СНМ є систематичне зменшення значень висоти. Як свідчить аналіз індивідуальних показників дерев № 11 і № 13 (табл. 1),

2. Статистичні показники

Статистичні показники	Роздільна здатність СНМ, м/пікс							
	0,04	0,1	0,3	1	3	5	10	30
Середнє арифметичне значення, м	32,04	31,96	30,55	26,92	16,85	12,80	9,16	8,56
Похибка вимірювання, м	-0,76	-0,84	-2,25	-5,88	-15,95	-20,00	-23,65	-24,24
Відносна похибка, %	2,3	2,6	6,9	17,9	48,6	61,0	72,1	73,9

Рис. 5. Середні арифметичні значення висоти модельних дерев за різної роздільної здатності СНМ

у першому випадку відбувається поступове зменшення, в другому – різке. Зокрема, за порівняння послідовних растрів роздільної здатності в 1,0 та 3,0 м/пікс для модельного дерева № 13 відмінність становила понад 3 рази за висотою дерева за встановленими координатами верхівки цього дерева. Разом з тим, попередні та наступні значення не мали такої суттєвої різниці між собою. Візуальний аналіз растрів (рисунки 1 і 3) дає можливість висунути припущення, що така велика розбіжність у показниках може бути спричинена розмірами крони. Через це потрібна додаткова експериментальна робота з використання растрових зображень СНМ різної роздільної здатності та глобальних карт висоти пологів лісу (Hansen et al., 2013) для визначення висоти дерев або її якісного прогнозування.

Висновки і перспективи. За результатами дослідження можна стверджувати, що чим вища роздільна здатність растрових зображень, тим вища точність одержаних результатів. Зокрема це стосується і хмари точок, яка є основою для розрахунку цифрової моделі місцевості та цифрової моделі рельєфу, тобто чим вища щільність такої хмари, тим більша точність отриманої моделі, за умови рівномірності розташування точок у хмарі за об'єктом інтересу. За даними виконаних досліджень обґрунтовано неефективність використання растрових зображень СНМ низької роздільної здатності для встановлення висоти ростучого дерева в насадженні. Відповідно перевірка отриманих результатів відображає збільшення помилки визначення висоти у разі зменшення роздільної здатності растрового зображення.

Список літератури

- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuzevich, V. S. (2020). Determination of the canopy density of forest stand by the materials of UAV survey. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (1), 13–23. <https://doi.org/10.31548/forest2020.01.013> [in Ukrainian].
- 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. <https://doi.org/10.15421/40280104> [in Ukrainian].
- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuziovych, 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> [in Ukrainian].
- Emery, W. J., & Camps, A. (2017). *Introduction to satellite remote sensing: Atmosphere, ocean, land and cryosphere applications*. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1158605>
- Fengabed, H., Panabe, L., Yan, F., Peiabg, H., Wang, H., Yang, G., Liuabg, M., & Wuabg, Z. (2018). Height and Biomass Inversion of Winter Wheat Based on Canopy Height Model. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7711–7714. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518726>
- Forsman, M., Börnin, 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>
- Frey, J., Kovach, K., Stemmler, S., & Koch, B. (2018). UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. *Remote Sensing*, 10 (6), 912. <https://doi.org/10.3390/rs10060912>
- 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>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., et al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342 (6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Holiaka, D., Kato, H., Yoschenko, V., Igarashi, Ya., Onda, Yu., Holiaka, M., Gumeniuk, V., Lesniak, O., et al. (2018). Identification and estimation of heights of the scots pine trees in the chernobyl exclusion zone using stereophotogrammetry method. *Abstracts of Reports of the Participants of the International Scientific-Practical Conference 'Problems of Development of Forest Taxation, Forest Management and Forest Inventory'*, December 6–8, 2018, 21–22. Available at https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u32/zbirnik_tez_mizhnarodnoyi_konferenciyi_nikitina_k_ie_6-7.12.18r.pdf [in Ukrainian].
- 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. <https://doi.org/10.15421/40281003> [in Ukrainian].
- Joseph, G. (2011). *Fundamentals of remote sensing* (2. ed., reprinted). Universities Press.
- Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönnholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., & Maltamo, M. (2004). *Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurements*.
- Liu, H., & Dong, P. (2014). A new method for generating canopy height models from discrete-return LiDAR point clouds. *Remote Sensing Letters*, 5 (6), 575–582. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.938180>
- Liu, L., Lim, S., Shen, X., & Yebr, M. (2019). A multiscale morphological algorithm for improvements to canopy height models. *Computers & Geosciences*, 130, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.05.012>
- Medvedev, A. A., Telnova, N. O., Kudikov, A. V., & Alekseenko, N. A. (2020). Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 17 (1), 150–163. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163> [in Russian].
- 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). <https://doi.org/10.31548/bio2018.05.018> [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. <https://doi.org/10.31548/forest2019.02.051> [in Ukrainian].

- Roy, P. S., Behera, M. D., & Srivastav, S. K. (2017). Satellite Remote Sensing: Sensors, Applications and Techniques. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 87 (4), 465–472. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0428-8>
- Strochinskiy, A. A. (1992). *Methodical and normative-information provision of a system for regulating the forest plantations productivity in Ukraine* (UACA). [in Ukrainian].
- Instructions for arranging the forest fund of Ukraine. (2014). Available at http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=119314 [in Ukrainian].
- Wada, Y. (2017). Case Study of Forest Inventory using Drone for Deforestation and Forest Degradation Monitoring. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56 (5), 191–195. <https://doi.org/10.4287/jsprs.56.191>

Diachuk, P. P. (2020). Determination of tree height according to data of raster images different resolution. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 15–24. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.002>

The collection of information on the growth and development of trees is the basis for planning forestry and horticulture, while the relevance and reliability of such data defines the quality of forest and park inventory outputs. Currently in Ukraine, the height of growing trees and shrubs is measured mostly by clinometer. The enhancement of unmanned aerial vehicles (UAVs) and methods of processing the collected information allow to amplify the level of quality and accuracy of the collected data.

Our goal was to consider the possibility of determining the height of trees based on aerial photography materials obtained by UAVs and to assess the accuracy of measured indicators modeling crown height at different spatial resolutions.

Here we used methods of creating a digital canopy height model (CHM) from aerial photographs obtained by UAVs. We produced 8 digital elevation and terrain models for the calculation of CHM. Raster image analysis was performed using the ArcGIS software and Spatial Analyst toolkit using the Focal statistics filter. We have confirmed the possibility of CHM utilization to measure the height of trees in structurally homogeneous stands. Here we have shown the change of height values of Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.) and the deviation of the arithmetic mean value of the height for model trees applying the raster images with different spatial resolutions. Predicted tree heights were compared with the empirical values, which were obtained directly measuring the felled sample trees with the addition of stump height.

CHM analysis with a cell size of 0.04 m² and 0.1 m² shows the smallest height deviations for model trees in the stand. The deviations relative to arithmetic mean were 2.3 % and 2.6 %. Raster images with a more coarse resolution (more than 1 m²) are not recommended in forest practice, since their utilizing entails a measurement error of 17% and higher, and thus exceeding the permissible deviations in tree height measurements according to the forest inventory guidelines currently applied in Ukraine.

Keywords: canopy height model, digital elevation model, digital terrain models, unmanned aerial vehicle, point cloud, Scots pine.

Отримано: 2020-08-25