

УДК 630*522:630*587.5

И. В. Толкач, Е. А. Шульга

Белорусский государственный технологический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ И ДИАМЕТРОВ КРОН ДЕРЕВЬЕВ
ПО ДАННЫМ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ**

Разработка методов таксации насаждений, основанных на передовых технологиях аэро- и космической съемки лесов, является одним из основных направлений современных научных исследований. Основная цель работы заключается в определении высот и диаметров кроны деревьев по материалам лидарной съемки, выполненной воздушным сканером AlphaAir 450, установленным на квадрокоптере Matrice 300 RTK на 3-осевом стабилизированном подвесе. Объектами исследования послужили насаждения сосны и пихты Центрального лесничества Негорельского учебно-опытного лесхоза. Обработка данных лазерного сканирования выполнялась в географической информационной системе SAGA. В результате исследования предложена методика обработки данных лазерного сканирования для определения высот и диаметров кроны деревьев; построены регрессионные уравнения связи между показателями, измеренными в ходе полевых работ, и показателями, полученными по данным лидарной съемки. В качестве регрессионного уравнения хорошие результаты аппроксимации показали линейные уравнения, коэффициент детерминации которых объясняет изменчивость высот и диаметров кроны деревьев не ниже 80,16 и 87,96% соответственно. Апробированная методика может быть использована для целей инвентаризации лесов и получения достаточно точных данных о труднодоступных насаждениях и лесах, загрязненных радионуклидами.

Ключевые слова: лазерное сканирование, высота дерева, диаметр кроны дерева, облако точек, цифровая модель высот.

Для цитирования: Толкач И. В., Шульга Е. А. Определение высот и диаметров кроны деревьев по данным лидарной съемки // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 15–21.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-2.

I. V. Tolkach, E. A. Shulga

Belarusian State Technological University

**DETERMINATION OF HEIGHTS AND DIAMETERS
OF TREE CROWNS FROM LIDAR DATA**

The development of methods of plantation taxation based on advanced technologies of aerial and space forest survey is one of the main directions of modern scientific research. The main objective of the work is to determine the heights and diameters of tree crowns based on lidar survey materials, performed by the AlphaAir 450 airborne scanner, mounted on a Matrice 300 RTK quadcopter on a 3-axis stabilized suspension. The objects of the study were pine and fir plantations of the Central Forestry Department of the Negorelsky experimental forestry. Processing of laser scanning data was carried out in the geographic information system SAGA. As a result of the study, the methodology of laser scanning data processing for determining the heights and diameters of tree crowns was proposed; regression equations of the relationship between the indicators measured during field work and the indicators obtained from lidar survey data were constructed. As a regression equation, linear equations showed good approximation results, the coefficient of determination of which explains the variability of tree crown heights and diameters not lower than 80.16 and 87.96%, respectively. The tested methodology can be used for the purposes of forest inventory and obtaining sufficiently accurate data on hard-to-reach plantations and forests contaminated with radionuclides.

Keywords: laser scanning, tree height, tree crown diameter, point cloud, digital elevation model.

For citation: Tolkach I. V., Shulga E. A. Determination of heights and diameters of tree crowns from lidar data. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 15–21 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-2.

Введение. В современном лесоустройстве и лесном хозяйстве Республики Беларусь широко используются материалы дистанционного зондирования, полученные с воздушных и космиче-

ских летательных аппаратов, а также ГИС-технологии, обеспечивающие обработку как цифровых снимков оптического диапазона, так и пространственных данных лазерного сканирования [1, 2].

Улучшение характеристик материалов дистанционного зондирования и появление новых типов пространственных данных открывает широкие возможности для управления природными ресурсами, включая решение задач инвентаризации и управления лесами. Сегодня большое количество исследований направлено на разработку методик обработки и применения материалов дистанционного зондирования для решения практических задач лесного хозяйства [3]. Для решения задач инвентаризации лесов рассматриваются материалы аэрофотосъемки [4], космической съемки [5], лазерной съемки [6].

Лазерное сканирование является одним из самых современных и производительных методов измерений и позволяет создавать цифровую трехмерную модель объекта, представив его набором точек с пространственными координатами. Технология основана на использовании новых геодезических приборов – лазерных сканеров, измеряющих координаты точек поверхности объекта со скоростью порядка нескольких десятков тысяч точек в секунду и формирующих набор данных, называемый «облаком точек». В процессе съемки для каждой из них записываются три координаты (*XYZ*) и численный показатель интенсивности отраженного сигнала в определенном спектральном диапазоне, который определяется свойствами поверхности сканируемого объекта [7]. К основным преимуществам данного метода можно отнести высокую производительность, детализацию и точность данных, возможность дистанционного использования оборудования и получения данных, а также снижение доли полевых работ в общих трудозатратах.

Исследования по использованию лазерного сканирования для получения таксационных характеристик отдельных деревьев и насаждений в Беларуси находятся на начальной стадии, хотя применение материалов лазерного сканирования в лесном хозяйстве позволит вывести изучение структуры лесных насаждений на принципиально новый уровень. В настоящее время существует ряд задач теоретического плана, без решения которых внедрение лидарной съемки в сферу лесного хозяйства и лесоустройства не обеспечит необходимую точность получаемых данных. А именно, требуется разработка методик обработки данных лазерного сканирования, практических рекомендаций по применению лазерной съемки для лесной таксации, регрессионных моделей связи между таксационными показателями, полученными в результате обработки данных лазерного сканирования и измеренными в полевых условиях.

Основная часть. Главной целью исследования является определение высот и диаметров

крон деревьев по материалам лазерного сканирования. В исследовании использованы материалы лидарной съемки части лесов Негорельского учебно-опытного лесхоза. Съемка выполнена воздушным сканером AlphaAir 450, конструктивно включающим сканирующую головку Livox Avia, высокоточный инерциальный модуль (IMU), встроенную 24-мегапиксельную камеру. Сканер AlphaAir 450 обеспечивает абсолютную точность от 5 до 10 см при шумах не более 30% [8]. Сканирование производится на большие расстояния (до 450 м) с высокой плотностью точек на измеряемой поверхности, которая при высоте полета 100 м составляет около 280 точек/м² [9]. Общая площадь отсканированного участка лесного фонда составила 50 га, съемка выполнена с высоты 100 м. В результате сканирования получено облако точек, средняя плотность которого с учетом перекрытий полос съемки составила 326 точек на 1 м².

Для получения таксационных показателей насаждений по материалам лазерного сканирования построена цифровая модель высот деревьев. В качестве программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования использована географическая информационная система SAGA (System for Automated Geoscientific Analysis), являющаяся свободно-распространяемым программным обеспечением (ПО) с открытым исходным кодом и обеспечивающая возможность редактирования пространственных данных. Благодаря совместной с Laserdata GmbH разработке, SAGA позволяет не только визуализировать, но и анализировать данные облака точек. Есть возможности для проведения классификации без обучения, выборки данных по заданному признаку, интерполяции с учетом количества зарегистрированных импульсов и диапазонов их значений [10]. Обработка данных лазерной съемки выполнена в несколько этапов.

Первичный анализ данных лазерного сканирования показал, что в соответствии с целью исследования (определение высот и диаметров крон деревьев) полученная плотность 326 точек на 1 м² является избыточной и может быть снижена. В связи с этим на первом этапе обработки данных лазерного сканирования произведен случайный отбор, после чего средняя плотность облака точек уменьшилась в 14 раз и составила 23 точки на 1 м². Данной плотности достаточно для проведения исследования [9].

На втором этапе исключены точки маршрута, не содержащие информацию о цвете, путем выборки пустых значений в поле Color, а также посредством селектирования удалены имеющиеся шумы и выбросы точек, высоты которых значительно отличались от средних высот

поверхности земли и полога древостоя. Оставшиеся точки классифицировались средствами программного обеспечения SAGA GIS по поверхности земли, и после дополнительного удаления выбросов и шумов формировалась векторная цифровая модель рельефа участка.

На следующем этапе векторная цифровая модель рельефа на основании средних значений точек преобразовывалась в растровый формат с размером ячеек 5,0×5,0 м. Формирование цифровой растровой модели поверхности полога древостоя производилось аналогичным способом, однако размер ячеек составлял 0,3×0,3 м и в качестве значения принималось максимальное.

Из-за неравномерной плотности облака точек полученные растры имели незаполненные участки. Образовавшиеся пустоты заполнялись с помощью инструмента Close Gaps (закрывать пробелы). На завершающем этапе был выполнен расчет раstra цифровой модели высот деревьев как разности цифровых моделей полога древостоя и рельефа с использованием калькулятора растров [11]. Измерения высот и диаметров крон деревьев по данным лазерного сканирования выполнялись средствами SAGA GIS.

Объектами исследования являлись разновозрастные насаждения сосны и пихты. Для получения истинных таксационных показателей насаждений на территории Центрального лесничества Негорельского учебно-опытного лесхоза было заложено 4 таксационно-дешифровочные пробные площади. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев на пробных площадях представлена в табл. 1.

Отвод и таксация пробных площадей выполнялись в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки» [12]. Пробная площадь закладывалась в наиболее однородной по таксационным показателям части выдела. На данной площади проводился сплошной пересчет деревьев по породам, ступеням толщины, качественным категориям и степени участия крон деревьев в формировании видимого на аэрофотоснимке полога древостоя.

На каждой пробной площади производился обмер учетных деревьев. У каждого дерева были измерены диаметры на высоте груди (d_m), высота дерева (h), диаметр кроны (d_k), высота до наибольшего диаметра кроны (h_{dk}), высота до начала кроны ($h_{нк}$), протяженность кроны (l_k), а также определены густота, вертикальная и горизонтальная формы крон [13]. Для измеренных деревьев на пробных площадях рассчитаны основные статистические показатели. Данные статистического анализа отображены в табл. 2. Анализ средних значений показывает занижение высот и диаметров крон деревьев по данным лазерного сканирования относительно показателей, измеренных на местности. Среднеквадратическое отклонение по всем показателям не превышает 2,30 м. Коэффициент вариации для измеренных высот деревьев и высот деревьев по данным лазерного сканирования изменяется от 5,69 до 9,19% и от 5,22 до 9,58% соответственно, для фактических диаметров крон и диаметров по данным лазерного сканирования – от 15,66 до 24,76% и от 15,91 до 24,76% соответственно. Асимметрия и эксцесс в выборках варьируют для высот от -2,79 до 1,77, для диаметров крон деревьев от -1,46 до 3,50.

Таблица 1

**Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев
на пробных площадях**

№ ПП	Квартал/ выдел	Площадь ПП, га	Тип леса	ТУМ	Характеристика по элементам леса							
					Элемент леса	Коэффициент участия, %	A , лет	$H_{ср}$, м	$D_{ср}$, см	P	Бонитет	M , м ³ /га
1	38/17	0,24	П. кис.	Д2	П	100	29	15,0	26,0	0,77	Ia	218
2	39/7	1,00	С. ор.	В2	С	66	75	29,2	32,8	0,42	Ia	219
					Е	13		20,3	18,2	0,12		44
					Б	20		28,8	29,7	0,16		67
					Итого по ПП № 2			100				0,70
3	39/20	0,49	С. кис.	С2	С	100	71	27,3	31,3	0,84	Ia	400
4	39/24	0,77	С. кис.	С2	С	55	34	15,8	18,3	0,42	Ia	108
					Е	45		15,6	15,6	0,35		89
Итого по ПП № 4				100			0,77			197		

Примечание. ПП – пробная площадь; ТУМ – тип условий местопроизрастания; A – возраст; $H_{ср}$ – средняя высота; $D_{ср}$ – средний диаметр; P – полнота; M – запас.

Таблица 2

**Основные статистические показатели распределения высот
и диаметров крон деревьев на ПП**

Параметры	Высота дерева по данным		Диаметр кроны дерева d_k	Диаметр кроны дерева по данным лазерного сканирования $d_{k, las}$
	полевых работ h	лазерного сканирования h_{las}		
ПП № 1				
Среднее значение, м	14,75	14,55	5,23	4,80
Среднеквадратическое отклонение, м	1,36	1,39	0,91	0,92
Коэффициент вариаций, %	9,19	9,58	17,47	19,25
Минимальное значение, м	12,00	11,60	3,00	2,50
Максимальное значение, м	17,80	17,70	8,80	8,10
Асимметрия	1,45	1,45	1,14	0,85
Экссесс	-1,23	-0,98	3,50	2,34
ПП № 2				
Среднее значение, м	30,72	30,71	5,07	4,83
Среднеквадратическое отклонение, м	1,85	1,89	0,79	0,77
Коэффициент вариаций, %	6,01	6,16	15,66	15,91
Минимальное значение, м	26,80	26,60	3,00	2,70
Максимальное значение, м	34,10	33,90	6,50	6,30
Асимметрия	-0,41	-1,32	-1,46	-1,54
Экссесс	-0,48	-0,28	0,77	1,32
ПП № 3				
Среднее значение, м	29,13	28,79	4,61	4,42
Среднеквадратическое отклонение, м	2,24	2,30	1,03	1,05
Коэффициент вариаций, %	7,69	7,99	22,26	23,68
Минимальное значение, м	21,8	21,10	3,00	3,00
Максимальное значение, м	32,9	33,10	7,80	7,80
Асимметрия	-2,79	-3,40	2,62	2,65
Экссесс	1,77	2,84	1,10	1,33
ПП № 4				
Среднее значение, м	17,70	16,92	4,40	3,98
Среднеквадратическое отклонение, м	1,01	0,88	1,09	0,99
Коэффициент вариаций, %	5,69	5,22	24,76	24,76
Минимальное значение, м	15,00	14,40	1,80	1,80
Максимальное значение, м	19,30	18,30	7,10	6,50
Асимметрия	-1,05	-1,47	0,03	0,86
Экссесс	0,02	0,16	1,03	1,04

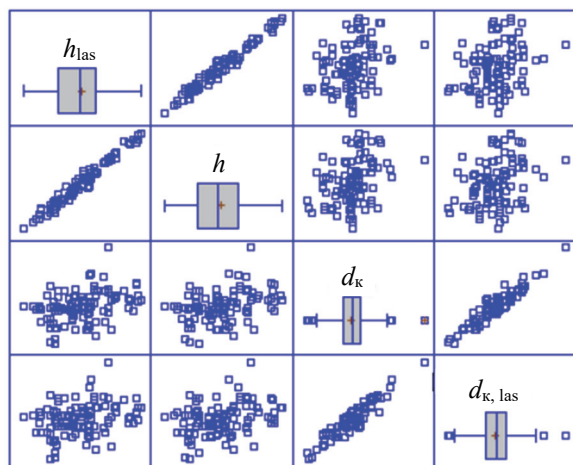
Также на всех пробных площадях для измеренных показателей и показателей по данным лазерного сканирования выполнен корреляционный анализ. Результаты корреляционного анализа для ПП № 1 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа ПП № 1

Параметры	h	h_{las}	d_k	$d_{k, las}$
h	1	0,986	0,346	0,274
h_{las}	0,986	1	0,366	0,298
d_k	0,346	0,366	1	0,938
$d_{k, las}$	0,274	0,298	0,938	1

Анализ табл. 3 показывает высокую зависимость между диаметрами крон деревьев, полученными в ходе полевых работ и определенными по данным лазерного сканирования. То же самое можно сказать и о зависимости между высотами. Наименьший коэффициент корреляции наблюдается между значениями высот и диаметров крон деревьев по данным лазерного сканирования. Целесообразно строить регрессионное уравнение между показателями с высоким коэффициентом корреляции. Корреляционная матрица для ПП № 1 отображена на рисунке, где наглядно показаны зависимости между показателями.



Корреляционная матрица для ПП № 1

Формирование моделей связи между данными, полученными в процессе лазерного сканирования и в полевых условиях, выполнено с использованием методов математической статистики. В ходе исследования апробированы различные функции: линейная, параболические функции 2-го и 3-го порядков [14, 15]. При моделировании связей между фактическими высотами деревьев и высотами, полученными по данным лазерного сканирования, а также между диаметрами крон в полевых условиях и по данным лазерного сканирования наилучшие результаты показывает линейная функция ($y = a + bx$). Параметры функции связи высот ($h = a + bh_{las}$) приведены в табл. 4, а параметры функции связи диаметров крон ($d_k = a + bd_{k, las}$) – в табл. 5.

Полученные уравнения значимы по коэффициенту Фишера. Все параметры приведенных уравнений весомы по t -критерию. Коэффициент детерминации для линейного уравнения связи высот варьирует от 80,16 до 97,25%. Стандартная ошибка изменяется от 0,23 до 0,88 м. Для линейного уравнения связи диаметров крон деревьев коэффициент детерминации изменяется в

диапазоне от 87,96 до 97,45%. Стандартная ошибка меняется от 0,17 до 0,32 м.

Регрессионное уравнение зависимости диаметров деревьев от их высот и диаметров крон, полученных по данным лазерного сканирования, имеют невысокий коэффициент детерминации (от 5 до 52%). Вероятно, это связано с тем, что выполнены измерения господствующих деревьев, имеющих приблизительно одинаковые размеры, кроны которых были хорошо видимы как по трехмерным моделям полога древостоя, полученным на основе данных лазерного сканирования, так и на аэрофотоснимках в оптическом диапазоне.

Заключение. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы: 1) снижение количества точек лидарной съемки обеспечивает более высокую скорость обработки данных и получение достаточно точных значений высот и диаметров крон деревьев; 2) отмечается высокая корреляция между высотами по данным полевых работ и лазерного сканирования, а также между диаметрами крон измеренными и определенными по данным лазерного сканирования. В связи с этим целесообразно строить регрессионное уравнение между данными показателями. Низкая связь наблюдается между высотами, полученными в ходе полевых работ, и диаметрами крон деревьев по данным лазерного сканирования; 3) регрессионные уравнения связи характеризуются высоким коэффициентом детерминации: для высот – от 80,16 до 97,25%, для диаметров крон – от 87,96 до 97,45%, и невысокой стандартной ошибкой: для высот – от 0,23 до 0,88 м, для диаметров крон деревьев – от 0,17 до 0,32 м; 4) высоты и диаметры крон деревьев могут быть получены с высокой точностью на основе регрессионных моделей связи с показателями, измеренными на цифровой растровой модели высот деревьев, а также определенными по апробированной в этом исследовании методике на основе данных лазерного сканирования.

Таблица 4

Параметры линейной функции связи высот ($h = a + bh_{las}$)

Параметры	ПП № 1	ПП № 2	ПП № 3	ПП № 4
Коэффициент a	0,803106	2,30492	2,83491	0,44164
Коэффициент b	0,958609	0,92528	0,89586	1,02020
Коэффициент детерминации R^2 , %	97,25	89,86	84,83	80,16
Критерий Фишера F	60,65	15,47	16,72	11,72
Стандартная ошибка SE , м	0,23	0,60	0,88	0,46

Таблица 5

Параметры линейной функции связи диаметров крон ($d_k = a + bd_{k, las}$)

Параметры	ПП № 1	ПП № 2	ПП № 3	ПП № 4
Коэффициент a	0,77774	0,20881	0,33194	0,19175
Коэффициент b	0,92894	1,00603	0,96798	1,05794
Коэффициент детерминации R^2 , %	87,96	94,85	97,45	91,51
Критерий Фишера F	27,57	22,30	43,75	19,14
Стандартная ошибка SE , м	0,32	0,18	0,17	0,32

Список литературы

1. Толкач И. В. Основные направления развития системы лесоустройства и методов инвентаризации лесов Беларуси // Труды БГТУ. 2015. № 1 (174): Лесное хоз-во. С. 50–53.
2. Переволоцкая Т. В. Геоинформационные системы в лесном хозяйстве. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. 40 с.
3. Толкач И. В., Саевич Ф. К. Спектральные и яркостные характеристики основных лесообразующих пород на снимках сканера LEICA ADS100 // Труды БГТУ. 2016. № 1 (183): Лесное хоз-во. С. 24–27.
4. Жирин В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П. Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat // Исследование земли из космоса. 2016. № 5. С. 10–20.
5. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев / В. Ф. Ковязин [и др.] // Изв. вузов. Лесной журн. 2020. № 6. С. 42–54.
6. Черниковский Д. М., Алексеев А. С. Определение средних высот и запасов древостоев на основе обработки информации топографической радарной съемки, цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // Тр. СПИИРАН. 2019. Вып. 18, т. 2. С. 416–443.
7. Руденко Ю. М., Богданец Е. С. Актуальность лидарной съемки на данном этапе развития лазерного сканирования // Технические науки – от теории к практике: материалы LVIII междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 20 апр. 2016 г. Новосибирск, 2016. № 5, ч. I. С. 20–29.
8. Воздушный сканер AlphaAir 450 // CHCNAV. URL: <https://www.chcnav.by/product-page/alphaair-450> (дата обращения: 31.01.2023).
9. Шульга Е. А., Толкач И. В. Распределение облака точек лидарной съемки в пологе и под пологом древостоев // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 478–481.
10. Открытая настольная ГИС SAGA – общая характеристика // GIS-Lab. URL: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (дата обращения: 02.10.2023).
11. Шульга Е. А. Построение цифровой модели высот по данным лазерного сканирования // Сб. науч. работ 74-й науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов, Минск. 17–22 апр. 2023. С. 22–24.
12. Пробные площади лесоустройственные. Метод закладки: ОСТ 56-69-83. М.: Стандарты, 1983. 23 с.
13. Толкач И. В. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве. Минск: БГТУ, 2012. 337 с.
14. Математические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В. Л. Черных [и др.] // ЛАНБ. Электронно-библиотечная система. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=39601 (дата обращения: 02.10.2023).
15. Ожич О. С., Толкач И. В., Коцан В. В. Использование регрессионных моделей для оценки таксационных показателей древостоев при аналитико-измерительном дешифрировании // Лесное хоз-во: материалы 84-й науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию юбилею БГТУ и Дню белорус. науки (с междунар. участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. Минск, 2020. С. 26–27.

References

1. Tolkach I. V. Main directions of development of forest inventory system and methods of forest inventory in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1 (174): Forestry, pp. 50–53 (In Russian).
2. Perevolotskaya T. V. *Geoinformatsionnyye sistemy v lesnom khozyaystve* [Geoinformation systems in forestry]. Gomel, GGU named after F. Skorina Publ., 2012. 40 p. (In Russian).
3. Tolkach I. V., Sayevich F. K. Spectral and brightness characteristics of the main forest-forming rocks on the LEICA ADS100 scanner images. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1 (183): Forestry, pp. 24–27 (In Russian).
4. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eidlina S. P. Assessment of the influence of tree canopy morphology and relief on the spectral characteristics of forests using Landsat data. *Issledovaniye zemli iz kosmosa* [Earth Exploration from Space], 2016, no. 5, pp. 10–20 (In Russian).
5. Kovyazin V. F., Vinogradov K. P., Kitsenko A. A., Vasilyeva E. A. Airborne laser scanning for specifying the taxation characteristics of forest stands. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [News of universities. Forest journal], 2020, no. 6, pp. 42–54 (In Russian).
6. Chernikhovskiy D. M., Alekseev A. S. Determination of average heights and reserves of forest stands on the basis of information processing of topographic radar survey, digital elevation models and GIS-technologies. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2019, issue 18, vol. 2, pp. 416–443 (In Russian).
7. Rudenko Yu. M., Bogdanets E. S. Relevance of lidar imaging at this stage of development of laser scanning. *Tekhnicheskkiye nauki – ot teorii k praktike: materialy LVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy*

konferentsii [Technical Sciences – from theory to practice: materials of the LVIII International scientific-practical conference]. Novosibirsk, 2016, no. 5 (53), part I, pp. 20–29 (In Russian).

8. AlphaAir 450 air scanner. Available at: <https://www.chcnv.by/product-page/alphaair-450> (accessed 31.01.2023) (In Russian).

9. Shulga E. A., Tolkach I. V. Distribution of lidar point cloud in the canopy and under the canopy of stands. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: materials of the 87th scientific and technical conference of professors, research workers and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 478–481 (In Russian).

10. Open desktop GIS SAGA – general characteristic. Available at: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (accessed 02.10.2023) (In Russian).

11. Shulga E. A. Construction of the digital model of heights by laser scanning data. *Sbornik nauchnykh rabot 74-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii uchashchikhsya, studentov i magistrantov* [Collection of scientific works of the 74th scientific-technical conference of pupils, students and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 22–24 (In Russian).

12. OST 56-69-83. Sample areas of forest inventory. Method of laying. Moscow, Standarty Publ., 1983. 23 p. (In Russian).

13. Tolkach I. V. *Aerokosmicheskiye metody v lesnom khozyaystve* [Aerospace methods in forestry]. Minsk, BSTU Publ., 2012. 337 p. (In Russian).

14. Chernyh V. L., Vlasova N. A., Kiseleva N. G., Vorozhcov D. M. Mathematical methods in forestry and landscape construction. Available at: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=39601 (accessed 02.10.2023) (In Russian).

15. Ozhich O. S., Tolkach I. V., Kotsan V. V. Use of regression models to assess the taxation indices of forest stands during analytical and measurement interpretation. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 84-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letnemu yubileyu BGTU i Dnyu belorusskoy nauki (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forestry: materials of the 84th scientific and technical conference, dedicated to the 90th anniversary of the Belarusian State Technology University and the Day of Belarusian science (with international participation)]. Minsk, 2020, pp. 26–27 (In Russian).

Информация об авторах

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Шульга Екатерина Александровна – магистрант кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: katherinashulga01@gmail.com

Information about the authors

Tolkach Igor Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Shulga Ekaterina Alexandrovna – master's degree student, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katherinashulga01@gmail.com

Поступила 15.10.2023