

Научная статья

УДК 630*51

doi : 10.34655/bgsha.2023.70.1.016

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАЗЕМНОГО МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ И ДИАМЕТРОВ ДЕРЕВЬЕВ В СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

Сергей Михайлович Устинов¹, Евгений Михайлович Митрофанов²,
Михаил Васильевич Устинов³

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия

¹serega32br@mail.ru

²seferok@mail.ru

³mvustinov@mail.ru

Аннотация. Объектом исследования являются древостои с преобладанием Сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в учебно-опытном лесхозе БГИТУ. Цель – исследование возможности использования наземного мобильного лазерного сканера для определения высот и диаметров деревьев в сосновых насаждениях. В статье приведен анализ существующих отечественных и зарубежных методов определения таксационных признаков древостоев по данным наземного лазерного сканирования. Обозначено существующее программное обеспечение для обработки данных лазерного сканирования. Излагается методика определения таксационных диаметров стволов и высот деревьев в древостое по данным наземного лазерного сканирования. Отмечается возможность использования данных наземного лазерного сканирования для измерения диаметров стволов на высоте 1,3 м и высоты у растущих деревьев сосны с использованием ПО на высоком достоверном уровне. Приведена статистически обоснованная оценка различий между: 1) таксационными диаметрами, полученными по данным измерений окружности ствола, и диаметрами, измеренными двумя методами с использованием ПО 3D Forest, по данным наземного лазерного сканирования; 2) высотами каждого дерева, полученными при измерении высотометром, и высотами, измеренными двумя методами с использованием ПО 3D Forest, по данным наземного лазерного сканирования. Отражены результаты изложенных сравнений диаметров и высоты, показывающие отсутствие существенных различий между сравниваемыми признаками. По результатам исследований отмечается возможность использования данных наземного лазерного сканирования для измерения диаметров и высоты деревьев сосны в древостоях.

Ключевые слова: лидар, древостой, диаметр, высота, лазерное сканирование.

Original article

STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING A GROUND-BASED MOBILE LASER SCANNER TO DETERMINE THE HEIGHT AND DIAMETER OF TREES IN PINE PLANTATIONS

Sergey M. Ustinov¹, Evgeny M. Mitrofanov², Mikhail V. Ustinov³

¹Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University), Moscow, Russia

³Bryansk State Engineering and Technology University, Bryansk, Russia

¹serega32br@mail.ru

²seferok@mail.ru

³mvustinov@mail.ru

Abstract. *The object of the study is stands with a predominance of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Educational and Experimental Forestry of BSETU. The aim of the research is to investigate the possibility of using a ground-based mobile laser scanner to determine the heights and diameters of trees in pine plantations. The article presents an analysis of domestic and foreign methods of determining the taxation features of forest stands according to the data obtained from a ground-based laser scanning. Existing software for laser scanning data processing is provided. The technique of the definition of taxation diameters of trunks and heights of trees in a forest stand according to the data of the ground laser scanning is stated. The article provides data on the possibility of using ground-based laser scanning to measuring trunk diameters at a height of 1.3 m as well as heights at growing pine trees at a high reliable level using necessary software. A statistically valid assessment of differences between: 1) taxation diameters obtained from tree trunks measuring and diameters measured by two methods using 3D Forest software from ground-based laser scanning data; 2) height of each tree obtained from altimeter measurements and heights measured by two methods using 3D Forest software from ground-based laser scanning data. The results of the comparisons of diameters and heights are presented, that show no significant differences between the features being compared. According to the results of the research, the possibility of using ground-based laser scanning data to measure the diameters and heights of pine trees in the stand is stated.*

Keywords: Light Detection and Ranging, stand, diameter, height, laser scanning.

Введение. По настоящее время наземные методы получения значений таксационных признаков древостоев предусматривают применение лесных мерных вилок, высотометров, полнотометров, различных мерных приборов для измерения расстояний, что требует больших трудозатрат и времени на выполнение полевых и камеральных работ. Применение современных информационных технологий, в частности лазерного сканирования и ГИС-технологий, позволит существенно снизить трудозатраты и время на эти работы, что является актуальным, а исследования в этой области перспективными.

Лазерное сканирование – единствен-

ный метод сбора данных о реальной поверхности, покрытой лесной растительностью, который позволяет получать данные исследуемых лесных объектов.

Многочисленные алгоритмы обработки данных лазерного сканирования были введены в течение последнего десятилетия. При этом ранние исследования были сосредоточены на основных параметрах дерева, таких как высота, диаметр на высоте груди (ДВН) и положение дерева [1], другие работы касались более сложных вопросов, таких как форма и размеры кроны [2], распределение света в насаждении [3] и индивидуальные оценки древесной биомассы [4]. Недавние раз-

работки нескольких приложений (например, SimpleTree [5], CompuTree [6] или AutoStem [7]) для извлечения различных параметров дерева из облаков точек, полученных при помощи наземного лазерного сканирования (TLS), демонстрируют возможности использования TLS лесоводами и исследователями леса в подробном анализе деревьев.

Также существует еще одно программное приложение по обработке данных лазерного сканирования для целей лесного хозяйства – 3D Forest, программное приложение для описания трехмерной структуры леса посредством параметризации отдельных деревьев и их крон [8].

Резюмируя изложенное, можно отметить, что многие исследования лесных экосистем основаны на пространственно-ориентированных данных. В исследованиях динамики лесов обычно используются большие участки, где положение и размер каждого дерева измеряется и записывается. Эти наблюдения принципиально двумерны, деревья представлены в виде точек с координатами X и Y основания дерева и другими параметрами. Однако леса, по своей сути, являются трехмерными системами.

Наземное лазерное сканирование, несомненно, способно привнести реальные трехмерные данные в исследования экологии и динамики лесов. Оно имеет большие перспективы для сбора пространственной информации в лесах из-за его высокой точности измерения, короткого времени сбора данных и высокой детализации [9]. TLS способен получать уровни детализации объектов намного превышающие возможности воздушного лазерного сканирования [10, 11] и, таким образом, может использоваться для описания древостоя на уровне отдельных деревьев.

Условия и методы исследования.

Исследования проводились в лесном фонде учебно-опытного лесхоза, который является характерным для всего Брянского лесного массива. В качестве объекта взяты древостои с преобладанием Сосны обыкновенной (лат. *Pinus sylvestris*) на 5 пробных площадях, заложенных в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки». Таксационная характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Таксационное описание пробных площадей

Состав	Возраст, лет	Бонитет	Тип леса	ТЛУ	Полнота	Подрост				Подлесок
						состав	возраст, лет	высота, м	к-во, т.шт./га	
10С+Е	75	I	БР	В2	0,8	9Е1С	25	2,0	1,0	редкий
10С+Е	45	IA	ЛИШВ	A1	0,6	9Е1С	10	1,0	1,0	редкий
10С	83	II	БР	A2	0,5	7С3Е	15	1,0	2,0	редкий
10С	54	I	БР	A2	0,7	–	–	–	–	–
10С	83	II	БР	A2	0,5	7С3Е	15	1,0	2,0	редкий

Целью работы является исследование возможности использования наземного мобильного лазерного сканера для определения высоты и диаметров деревьев в сосновых насаждениях.

В основу определения диаметров и высоты деревьев положен выборочный метод – метод пробных площадей (ПП). ПП подбирались в сосновых насаждениях с редким подростом и подлеском (или их отсутствием), так как они дают помехи

при съемке с мобильного лазерного сканера, что затрудняет определение в последующем значений показателей деревьев. Ограничений по возрасту, полноте, классу бонитета, типу лесорастительных условий (ТЛУ) и однородности древостоя не предусматривается.

Измерения лесоводственно-таксационных признаков на ПП проводились общеизвестными в таксации методами. При этом, для получения диаметра на высоте

1,3 м измерялась окружность ствола при помощи рулетки с точностью до 0,1 см, а высота – ультразвуковым высотомером VERTEX IV с точностью до 0,1 м. Сканирование осуществлялось наземным лазерным сканером GeoSLAM ZEB-HORIZON.

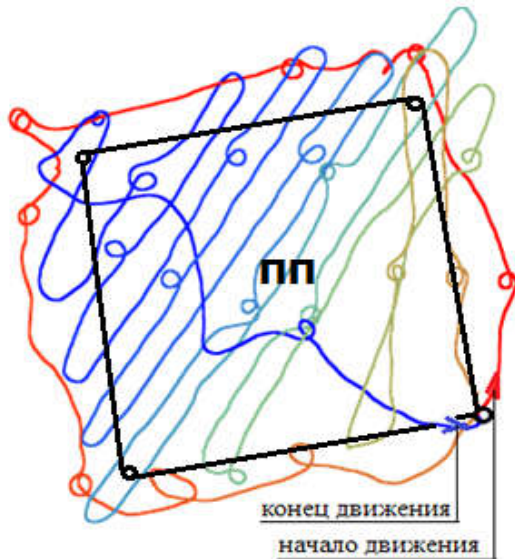


Рисунок 1. Схема маршрута при сканировании на ПП4

Съемка выполнялась челночным ходом с шагом между проходами 3-5 метров. Перед проходом «челноком» каждую пробную площадь обходили по периметру за ее границами примерно в 5 метрах от неё. Схема движения на ПП4 при съемке сканером приведена на рисунке 1.



Для тематической обработки данных лазерного сканирования использовалось открытое программное обеспечение, распространяемое по открытому лицензионному соглашению (GNU) – 3D Forest [8].

Перед тематической обработкой данных, полученных с мобильного наземного лазерного сканера, они регистрировались в проприетарном программном обеспечении, которое обычно поставляется с наземным лазерным сканером. Полученное облако точек затем разделялось на две части: 1) точки, представляющие поверхность земли; 2) все другие точки, которые в лесах обычно представляют собой растительность и поэтому называются облаком растительности.

Следующим шагом является сегментация облака растительности на отдельные деревья, т.е. облака деревьев. Это можно сделать автоматически [12, 13] или «вручную». Нами распознавание деревьев из облака точек выполнено «вручную» при помощи программного обеспечения Cloud Compare [14].

Для получения диаметра и высоты дерева по данным сканирования рекомендуем использовать открытое программное обеспечение 3D Forest [8]. В 3D Forest имеется два доступных метода для вычисления таксационного диаметра дерева: 1) рандомизированное преобразование Хафа (НТ) для обнаружения диаметра [15] на высоте 1,3 м; 2) регрессия наименьших квадратов (LSR) с алгебраической оценкой круга и геометрическим сокращением квадратов расстояний до вычисленного круга [16]. В обоих методах используется подмножество облака точек дерева – горизонтальный срез от 1,25 м до 1,35 м над поверхностью земли, называемое облаком DBH в среде 3D Forest.

Высота дерева определялась как разница в координатах Z между самой высокой точкой облака точек дерева и положением основания дерева (высота). Альтернативный метод (длина) вычисляет наибольшее евклидово расстояние между любыми двумя точками облака точек дерева. Таким образом, этот метод под-

ходит для расчета общей длины наклонённых, поваленных деревьев и лежащего сухостоя.

В качестве контроля брались таксационные диаметры стволов, вычисленные по длине измеренных окружностей рулеткой, а высота – измеренная ультразвуковым высотомером VERTEX IV (далее – полевые измерения). Данные измерений подвергались статистической обработке, по результатам которой оценивалась возможность применения наземной лазерной съемки для определения диаметров и высоты стволов деревьев.

Результаты измерения и их обсуждение. По данным полевых измерений и результатам наземной лазерной съемки определены и вычислены показатели таксационных диаметров и высота

деревьев сосны на 5 ПП. Фрагмент результатов измерений диаметров и высоты по данным наземной лазерной съемки приведен на рисунке 2.

Была проведена статистическая оценка диаметров и высоты на заложенных ПП по результатам полевых измерений и наземного лазерного сканирования. Результаты показывают, что распределение диаметров и высоты на ПП, полученные при полевых измерениях и двумя методами измерения для каждого показателя, по данным наземного лазерного сканирования, подчинено закону нормального распределения. Значения средних диаметров и высоты деревьев получены на высоком уровне доверительной вероятности $P=99,9\%$ при всех способах измерения.

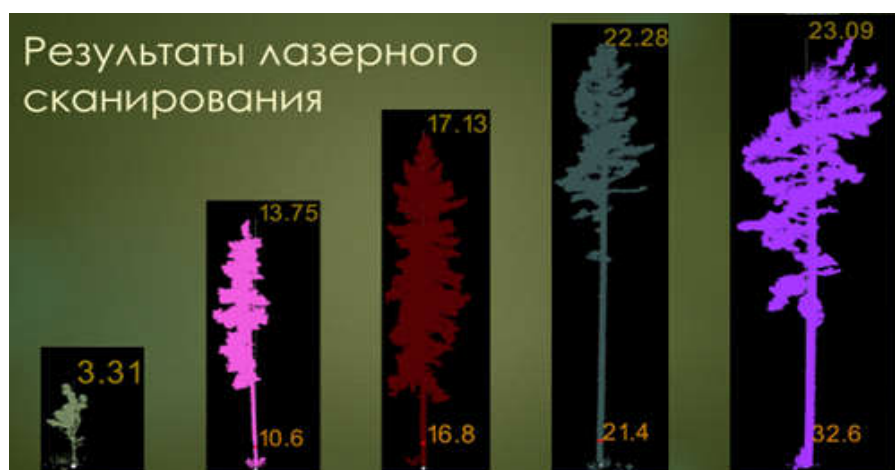


Рисунок 2. Результаты измеренных диаметров и высот по данным наземного лазерного сканирования

Средние значения отклонений средних диаметров и высоты деревьев, полученные по двум методам измерений для

каждого из показателей на основе данных лазерного сканирования, от полевых измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Средние значения отклонений диаметров и высоты от полевых измерений на ПП

Показатель, отклонение	ПП № 1	ПП № 2	ПП № 3	ПП № 4	ПП № 5
Диаметр					
Абсолютное по данным НТ, ± см	0,8	0,9	0,8	1,1	1,1
Относительное по данным НТ, %	3,8	4,3	3,5	3,9	4,5
Абсолютное по данным LSR, ± см	0,7	0,8	0,7	0,7	0,9
Относительное по данным LSR, %	3,4	3,5	3,0	2,6	4,1
Высота					
Абсолютное по данным высоты, ± м	0,2	0,3	0,2	0,2	0,5
Относительное по данным высоты, %	0,8	1,4	0,7	1,0	2,3
Абсолютное по данным длинны, ± м	0,3	0,4	0,2	0,2	1,5
Относительное по данным длинны, %	1,5	1,6	0,8	1,0	2,3

Анализ отклонений средних диаметров из таблицы 1 показывает, что значения диаметров стволов, вычисленных по данным наземного лазерного сканирования (НТ и LSR), по сравнению с полевыми измерениями, отличаются максимум на $\pm 1,1$ см (не более 4,5%). При этом нужно отметить, что у метода LSR ошибка вычисления диаметров меньше, чем при вычислениях методом НТ. Также из таблицы 1 видно, что абсолютные отклонения высоты, полученные при помощи наземного лазерного сканирования от полевых измерений, в среднем, составляют около 0,3 м (1–2%).

Дополнительно на ПП4 были получены полевые измерения высот некоторых деревьев при помощи ГИЛовского комплекса Field-Map (точность измерения 0,01 м). Измерения проводились у 7 деревьев с 3 точек съемки для каждого дерева. Представленный метод съемки позволяет достоверно точно определить высоту дерева. В результате получили абсолютное отклонение данных лидарной съемки от значений, полученных при помощи Field-Map, равное -0,28 м (-1,2%), что является очень хорошим результатом для целей лесного хозяйства.

Заключение. Исследования, приведенные в работе, показывают, что использование данных наземного лазерного сканирования для вычисления диаметров и высоты деревьев позволяют определить диаметры на высоте 1,3 м и высоты у растущих деревьев на высоком достоверном уровне. Полученная точность определения диаметров и высоты позволяет рекомендовать использование данных наземного лазерного сканирования для оценки диаметров и высоты растущих деревьев сосны обыкновенной.

На перспективу можно предположить, что данные наземного лазерного сканирования могут являться основой для определения средних диаметров, высоты, а также запасов, густоты и других таксационных показателей насаждений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Maas H.G., Bienert A., Scheller S., Keane E. Automatic Forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International // Journal of Remote Sensing*. 2008;29(5):1579 – 93.
2. Metz J., Seidel D., Schall P., Scheffer D., Schulze E.D., Ammer C. Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of aboveground intra- and interspecific competition on tree growth. *// Forest Ecology and Management*. 2013;310(0):275 – 88.
3. Seidel D., Hoffmann N., Ehbrecht M., Juchheim J., Ammer C. How neighborhood affects tree diameter increment—New insights from terrestrial laser scanning and some methodical considerations *// Forest Ecology and Management*. 2015;336(0):119 – 28.
4. Calders K., Newnham G., Burt A., Murphy S., Raunonen P., Herold M. et al. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning *// Methods in Ecology and Evolution*. 2015;6(2):198 – 208.
5. Hackenberg J., Spiecker H., Calders K., Disney M., Raunonen P. SimpleTree—An Efficient Open-Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds *// Forests*. 2015;6(11):4245–94.
6. Piboule A., Krebs M., Esclatine L., Hervé J. Computree: a collaborative platform for use of terrestrial LiDAR in dendrometry. LiForest True Reality Geospatial Solutions L. LiForest – LiDAR software for forestry applications. 2 ed. URL : <http://www.liforest.com/2015> (дата обращения: 06.01.2022).
7. TreeMetrics. AutoStem Forest. URL : <http://www.treemetrics.com/2015> (дата обращения: 03.01.2022).
8. 3D Forest—Terrestrial lidar data processing tool. URL: <https://www.3dforest.eu> (дата обращения: 05.04.2022).
9. van Leeuwen M., Nieuwenhuis M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing *// European Journal of Forest Research*. 2010;129(4):749–70.
10. Cote J.F., Fournier R.A., Frazer G.W., Niemann K.O. A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure *// Agricultural and Forest Meteorology*. 2012;166(0):72–85.
11. Hackenberg J., Morhart C., Shepard J., Spiecker H., Disney M. Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser

Scan Data: A Method Description // Forests. 2014;5(5):1069–105.

12. Trochta J., Krůček M., Vrška T., Král K. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR // PLOS ONE 12(5): e0176871. URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871> (дата обращения: 18.01.2022).

13. Eroshenkova D.A. Automated Determination of Forest-Vegetation Characteristics with the Use of a Neural Network of Deep Learning / D.A. Eroshenkova, V.I. Terekhov, S.I. Chumachenko // Studies in

Computational Intelligence. 2020. Vol. 856. Pp. 295-302. doi : 10.1007/978-3-030-30425-6_34.

14. CloudCompare – 3D point cloud processing software. URL: <http://www.cloudcompare.org> (дата обращения: 05.04.2022).

15. Xu L., Oja E. Randomized Hough Transform (Rht) – Basic Mechanisms, Algorithms, and Computational Complexities. Cvgip-Imag Understan. 1993;57(2):131–54.

16. Chernov N., Lesort C. Least Squares Fitting of Circles // Journal of Mathematical Imaging and Vision. 2005;23(3):239–52.

Сведения об авторах

Сергей Михайлович Устинов – аспирант, serega32br@mail.ru;

Евгений Михайлович Митрофанов – доцент кафедры «Лесоуправление, лесоустройство и геоинформационные системы», seferok@mail.ru;

Михаил Васильевич Устинов – доцент кафедры «Лесное дело», Институт лесного комплекса, ландшафтной архитектуры, транспорта и экологии, mvustinov@mail.ru.

Information about the authors

Sergey M. Ustinov – postgraduate student, serega32br@mail.ru,

Evgeny M. Mitrofanov – Associate Professor, Chair of Forest Management, Forest Inventory and Geographic Information Systems, seferok@mail.ru,

Mikhail V. Ustinov – Associate Professor, Forestry Chair, Institute of Forestry, Landscape Architecture, Transport and Ecology, mvustinov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 31.10. 2022; одобрена после рецензирования 23.11.2022; принята к публикации 20.02.2023.

The article was submitted 31.10.2022; approved after reviewing 23.11.2022; accepted for publication 20.02.2023.