

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>

УДК 630*5:004.94:528



ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСА

С.В. Шайтура¹, Н.С. Шайтура², Е.М. Митрофанов³, А.С. Мухин³, С.М. Устинов⁴

¹ Российский университет транспорта; 127055, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. Россия

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127422, Москва, Тимирязевская ул. д. 49, Россия

³ Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана; 141005, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, Россия

⁴ ООО «НПЦ «БизнесАвтоматика»; 119619, город Москва, ул. Авиаторов, д. 9 к.2. Россия

Аннотация. Лес является важной средой человеческого обитания. Для поддержания жизни на Земле очень важно осуществлять мониторинг лесного хозяйства. Мониторинг может осуществляться как методами дистанционного зондирования Земли, так и методами наземной съёмки. Цель исследований – изучение возможности получения таксационных параметров древостоя автоматизированными методами по трёхмерным измерительным сценам, построенным с использованием мобильных лазерных сканеров с достаточной точностью. Измерительная сцена содержит в себе цифровые модели местности в пределах её границы. Трёхмерная измерительная сцена является оптимальной основой для построения цифрового двойника лесной экосистемы. Лазерные сканеры позволяют не только повысить точность определения таксационных характеристик, но и сформировать картографические материалы, таких как подеревный план. В качестве исследуемой территории была выбрана одна из пробных площадей с чистым сосновым насаждением в Брянской области. Для повышения точности съёмка производилась три раза. Затем выполнялось распознавание и каталогизация деревьев. Результаты измерений импортировались геоинформационную систему, которая позволяла производить подеревный план в использовании стандартных инструментов геоинформационного моделирования. В результате исследования была разработана методика формирования трёхмерной измерительной сцены круговых пробных площадей постоянного радиуса для решения задач лесного сектора с использованием мобильного лазерного сканера.

Ключевые слова: лесное хозяйство, мониторинг, наземная лазерная съёмка, цифровое моделирование, геоинформационные системы, подеревный план

Формат цитирования: Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса // Природоустройство. 2024. № 3. С. 124-132. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>

Original article

APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNERS FOR FOREST MONITORING

S.V. Shaitura¹, N.S. Shaitura², E.M. Mitrofanov³, A.S. Mukhin³, S.M. Ustinov⁴

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127422, Moscow, Timiryazevskaya street, 49

³ Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 141005, Mytishchi, st. 1st Institutskaya, 1.

⁴ LLC “NPC “Business Automatika”; 119619, Moscow, st. Aviatorov, 9/2

Abstract. The forest is an important human habitat. Monitoring forestry is essential to sustain life on Earth. Monitoring can be carried out using both Earth remote sensing methods and ground-based survey methods. The purpose of this article is to describe a methodology for studying the possibility of using mobile laser scanners to form a three-dimensional measurement scene on a circular test area of constant radius. The latter contains digital models of the terrain within its borders. A three-dimensional measurement scene is the optimal basis for constructing a digital twin of a forest ecosystem. Specialists are usually forced to count trees manually. Laser scanners allow not only to increase the accuracy of determining taxation characteristics, but also to generate cartographic materials, such as a tree plan. One of the trial areas with a pure pine plantation in the Bryansk region was chosen as the study area. To improve accuracy, the survey was carried out three times. Tree recognition and cataloging was then

carried out. The measurement results were imported into a geographic information system, which made it possible to produce a tree-by-tree plan using standard geographic information modeling tools. As a result of the study, a technique was developed for generating a three-dimensional measuring scene of circular test plots of constant radius to solve problems in the forestry sector using a mobile laser scanner.

Keywords: forestry, monitoring, terrestrial laser survey, digital modeling, geographic information systems, tree plan

Format of citation: Shaitura S.V., Shaitura N.S., Mitrofanov E.M., Mukhin A.S., Ustinov S.M. Application of terrestrial laser scanners for forest monitoring // Prirodoobustrojstvo. 2024. No.3. P. 124-132. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>

Введение. Лес в жизни человечества является важной средой обитания [1]. Мониторинг состояния леса очень важно для поддержания жизни на Земле. Мониторинг леса является комплексной системой, которая включает в себя цифровую модель и методы дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование осуществляется при помощи космических аппаратов, самолётов и беспилотных летательных аппаратов. Вопросами глобального пространственного позиционирования и дистанционного мониторинга занимались ряд известных авторов: Бондур В.Г., Левин Б.А, Розенберг И.Н., Савиных В.П. [2-4]. Научными коллективами, которыми руководили эти учёные были разработаны принципы и методы мониторинга за пространственными объектами при помощи космических методов.

Мониторинг лесных массивов может осуществляться и наземным способом [5-9].

Цель исследований. Цель исследования – оценить возможность использования трёхмерных измерительных сцен, сформированных с использованием мобильного лазерного сканера GeoSLAM для получения значимых параметров древостоя автоматизированными методами для радиальной пробной площади. В работе рассматриваются подходы по автоматизированному получению таких таксационных параметров, как высота и диаметр ствола на высоте 1,3м, а также построение подеревного плана для лесной радиальной пробной площади. Рассматривается верификация полученных таксационных характеристик по лазерному скану с использованием геодезического оборудования и типовых инструментов, применяемых в лесной отрасли [10].

Материалы и методы. Предлагаемое авторами статьи решение применять для разбиения радиальных тестовых площадей лазерное сканирование даёт ряд преимуществ перед стандартными методиками – трёхмерная видеосцена сформированная на этапе обработки съёмки позволяет зафиксировать состояние изучаемой площади на дату съёмки, процесс её обработки позволяет получить информацию о координатах, диаметре и высотах отдельных деревьев

в автоматизированном режиме и на выходе будет генерироваться подеревный план в виде векторного слоя в геоинформационных системах (ГИС), содержащий в себе атрибутивную информацию по каждому из объектов.

Традиционно лазерное сканирование принято разделять на авиационное (ВЛС) и наземное (НЛС) [11, 12]. Поскольку радиальная тестовая площадь представляет собой сравнительно малую ограниченную локацию, наземные подходы лазерного сканирования подходят для её съёмки наиболее оптимально. Проигрывая воздушному лазерному сканированию в продуктивности выполнения работ, наземное лазерное сканирование даёт значительно более точную информацию об образах отдельных деревьев вплоть до составления скелета дерева.

Однако следует отметить, что наземное лазерное сканирование в свою очередь подразделяется на стационарное и мобильное. Теоретически методы наземного лазерного сканирования можно эффективно использовать для съёмки ограниченных по площади лесных локаций, получая при этом более точную метрическую информацию и качественную текстуру. Однако на практике далеко не всегда удаётся успешно использовать стационарные лазерные сканеры бюджетных моделей (прим. Leica BLK360) при съёмке древостоя, так как в процессе работ могут возникать технические затруднения, не позволяющие надёжно соотнести две и более перерывающиеся точки сканирования. Мобильные лазерные сканеры лишены подобных проблем, а их сравнительные со стационарными лазерными сканерами схожей ценовой категории точностные характеристики также обеспечивают получение заданных таксационных параметров с требуемой точностью на подеревном уровне. В процессе эксперимента, выполнявшегося в рамках исследования, использовался мобильный лазерный сканер ZEB – Horizon, хорошо зарекомендовавший себя при съёмке типовых лесных насаждений средней полосы Российской Федерации.

В качестве исследуемой территории была выбрана радиальная пробная площадь

радиусом 12,6 метров с чистым насаждением сосны в Брянской области в Брянском Учебно – опытном лесхозе БГИТУ (рис. 1). Выбор данной территории был обоснован наличием двумя факторами – на пробную площадь имелся большой набор данных, включая аэрофотосъёмку с беспилотного воздушного судна и общая простота территории, позволяющая оценить потенциал разработанной методики в близких к оптимальным условиям.

Один цикл измерений радиальной площади с использованием сканера Zeb – Horizon занимал от 2 до 5 минут, в зависимости от выбранной маршрутной схемы, и на выходе каждого захода генерировалось плотное облако точек.

Процесс обработки сырых данных сканирования, полученных с использованием мобильного лазерного сканера Zeb – Horizon, выполняется в специальном проприетарном программном обеспечении GEOSLAMHUB, которое поставляется вместе с прибором, с настройками, рекомендованными производителем и эксплуатантами для лесных территорий. Поскольку снимаемая территория имеет ограниченный размер, то при наличии мобильного ПК с высокими вычислительными характеристиками можно подобрать настройки предварительной обработки таким образом, чтобы произвести обработку в полевых условиях, если это необходимо. После обработки плотное облако экспортируется в универсальных форматах «.las» и «.laz», которые читаются большинством пакетов, предназначенных для обработки данных лазерного сканирования (CloudCompare, 360 LIDAR и др.) и геоинформационных системах (ArcGIS, Q-GIS и проч.). После сокращения размерности массивов пространственных данных по радиусу (с некоторым запасом) изучаемой радиальной пробной площади были получены

пригодные для обработки облака точек, состоящие из 12-16 миллионов отдельных элементов. При работе плотного облака, предназначенного для классификации образов отдельных деревьев, не рекомендуется использовать стандартные инструменты фильтрации, такие как удаление статистических выбросов и фильтр шумов, потому что их применение может «срезать» верхушки крон, что скажется на итоговой оценке высоты деревьев. Предварительная обработка сцены при выполнении эксперимента осуществлялась в свободно распространяемом программном обеспечении CloudCompare.

Трёхмерная измерительная видео – сцена представляет собой трёхмерную цифровую электронную модель территории, которая содержит в своём массиве цифровую модель рельефа и модель всех прочих объектов, расположенных в границах зоны [13, 14]. Данная сцена предназначена для визуализации или выполнения расчётно – измерительных операций с использованием специального программного обеспечения. При решении задач, связанных с моделированием в лесной отрасли, трёхмерная измерительная сцена является оптимальной основой для построения цифрового двойника лесной экосистемы. Полученная модель позволяет, при помощи алгоритмов и приборной базы, зафиксировать параметры древостоя на подеревном уровне с требуемой точностью [15, 16].

Задача закладки пробных площадей является для лесного сектора типовой, однако традиционные методы ее решения не предполагают применения современных приборов, таких как лазерные сканеры и формирования картографических материалов, таких как подеревный план. Фактически специалисты выполняют перечёт деревьев на площади в ручном режиме.

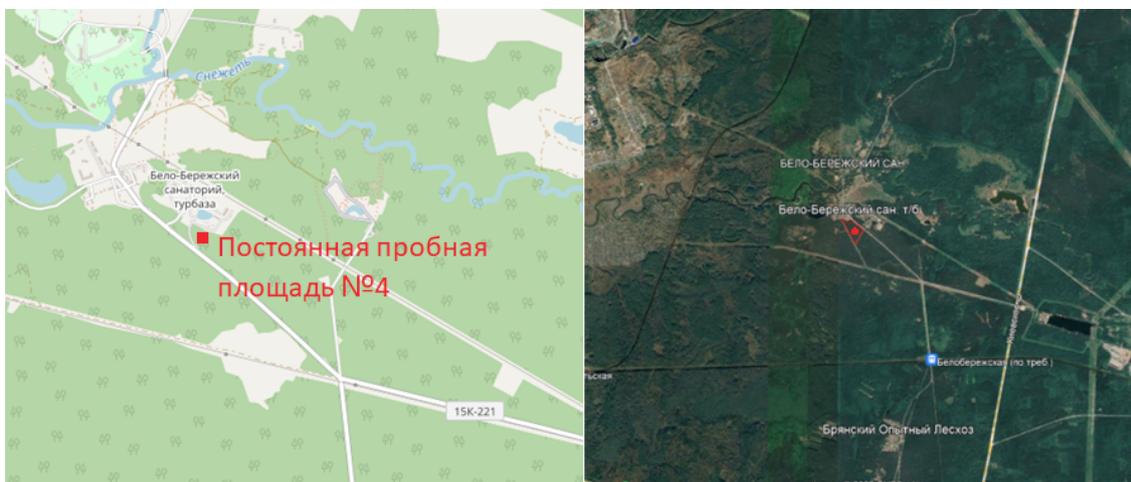


Рис. 1. Пространственное положение постоянной пробной площади на геопортале Google Earth

Fig. 1. Spatial position of the permanent trial plot on the geoportale GoogleEarth

В процессе эксперимента для верификации полученных данных выполнялись измерения диаметров на высоте груди стандартной мерной вилкой и высоты посредством стандартного высотомера SUUNTO PM-5, ультразвукового дальномера Vertex и электронного теодолита DT405L.

Результаты и обсуждение. Для оценки сходимости и воспроизводимости точности определения таксационных параметров по плотному облаку точек пробная площадь была отснята три раза с использованием различных маршрутных схем: съёмка по спирали, хождение по радиальным лучам, и маршрутные проходы с выдерживанием базиса, однако в данной статье не будут рассматриваться результаты их анализа. Всего один раунд измерений занимал 2-5 минут, в зависимости от выбранной маршрутной схемы, и на выходе каждого захода генерировалось плотное облако точек.

Процесс обработки сырых данных сканирования, полученных с использованием мобильного лазерного сканера ZEBHORIZON выполнялся в специальном программном обеспечении GEOSLAMHUB, которое поставляется вместе с прибором, с настройками рекомендованными производителем и эксплуатантами для лесных территорий. Поскольку снимаемая территория имеет ограниченный размер, то при наличии мобильного ПК с высокими вычислительными характеристиками можно подобрать настройки предварительной обработки таким образом, чтобы произвести обработку в полевых условиях, если это необходимо. После обработки плотное облако экспортируется в универсальных форматах .las и .laz, которые читаются большинством пакетов, предназначенных для обработки данных лазерного сканирования (CloudCompare, 360 LIDAR и др.) и в геоинформационных системах (ArcGIS, Q-GIS и проч.). После сокращения размерности массивов пространственных данных по радиусу (некоторым запасом) изучаемой радиальной пробной площади были получены пригодные для обработки облака точек, состоящие из 12-16 миллионов отдельных элементов. При обработке плотного облака, предназначенного для классификации образов отдельных деревьев, не рекомендуется использовать стандартные инструменты фильтрации, такие как удаление статистических выбросов и фильтр шумов, потому что их применение может «срезать» верхушки крон, что скажется на итоговой оценке высоты деревьев. Предварительная обработка сцены при выполнении эксперимента осуществлялась в свободно распространяемом программном обеспечении CloudCompare (рис. 2).

В процессе автоматизированной обработки плотного облака с целью получения информации о пространственном положении отдельных деревьев и их таксационных характеристиках применялся свободно распространяемый программный пакет 3D-Forest. Поэтому результаты обработки сканов радиальных пробных площадей в платных программных решениях, таких 360LIDAR, LeicaCyclone и их аналогах могут различаться.

На первом этапе обработки выполнялся переход от исходного облака точек к полноценной трёхмерной измерительной сцене, посредством классификации точек рельефа и выделения их из общего массива пространственных данных. В качестве алгоритма классификации использовался Octree (рис. 3).

На следующем этапе на основе точек, отнесённых к классу древесной растительности, выполнялось автоматизированное распознавание и каталогизация образов отдельных деревьев. Поскольку обрабатываемая сцена имеет сравнительно небольшую площадь, нет необходимости в процессе её обработки отрабатывать параметры дескриптора на обучающей выборке с последующим тиражированием результата. Настройки классификатора настраиваются сразу по всей радиальной площади (рис. 4).

После того, как результат классификации признан удовлетворительным, происходит ручная обработка получившихся образов с целью отбраковки кластеров, не относящихся к классу деревьев. Для оставшихся объектов

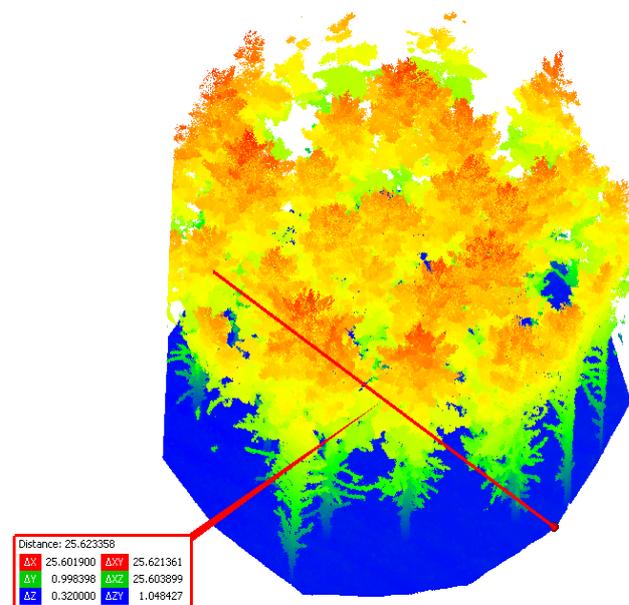


Рис. 2. Плотное облако точек, сформированное на тестовую радиальную площадь

Fig. 2. A dense point cloud formed on a test radial area

в автоматизированном режиме определяется положение точки роста, от которой в дальнейшем будет рассчитываться диаметр на высоте 1,3 м и высота дерева в автоматизированном режиме (рис. 5).

Результат анализа трёхмерной измерительной сцены экспортируется в табличном виде с целью последующего геокодирования в ГИС для автоматизированного построения поперечного плана с использованием стандартных инструментов геоинформационного моделирования (рис. 6).

В таблице 1 представлено сравнение диаметров, полученных по образам деревьев и измеренных в натуре традиционным методом

Анализируя представленную таблицу с данными о диаметрах, определённых традиционным способом и с использованием данных лазерного сканирования, можно сделать следующие выводы: в большинстве случаев диаметры, определённые с использованием данных лазерного сканирования, близки к значениям, полученным традиционным методом. Это свидетельствует о том, что лазерное сканирование может быть эффективным инструментом для измерения диаметров деревьев в лесных насаждениях.

Несмотря на некоторые различия, облако данных может быть полезным инструментом для измерения диаметров, но требует дополнительного внимания к точности и калибровке для каждого конкретного участка леса.

В таблице 2 представлено сравнение высот, полученных по образам деревьев и измеренных в натуре различными измерительными приборами.

В данной таблице представлены результаты измерения высоты деревьев с использованием трех различных методов: определение по образу, измерение с использованием прибора SUUNTO PM-5, и измерение с помощью электронного теодолита DT405L, а также прибора Vertex. Для каждого дерева указаны идентификатор образа и значения высоты, полученные каждым из методов измерения.

Анализ данных показывает, что значения высот деревьев, полученные различными методами, имеют небольшие различия.

Наибольшее отклонение высоты, определенной по образу, составило 0,74 метра от высоты, определенной высотомером SUUNTO PM-5, что составляет менее чем 4% относительного отклонения.

Наибольшая согласованность высот, определённых по наблюдениям с прибором Vertex. Относительные отклонения в этих случаях

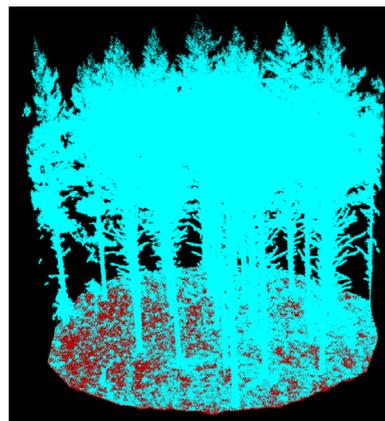


Рис. 3. Классификация точек рельефа и растительности с использованием алгоритма Octree

Fig. 3. Classification of relief points and vegetation using the Octree



Рис. 4. Формирование индивидуальных измерительных трёхмерных образов для каждого дерева на радиальной площади

Fig. 4. Formation of individual measuring three-dimensional images for each tree on the radial area

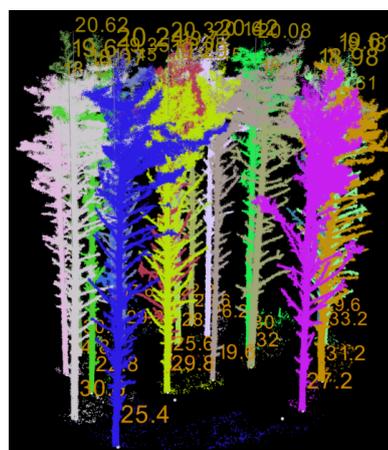


Рис. 5. Автоматизированный расчёт диаметров на высоте груди и высоты по образам отдельных деревьев

Fig. 5. Automated calculation of diameters at chest height and height from images of individual trees

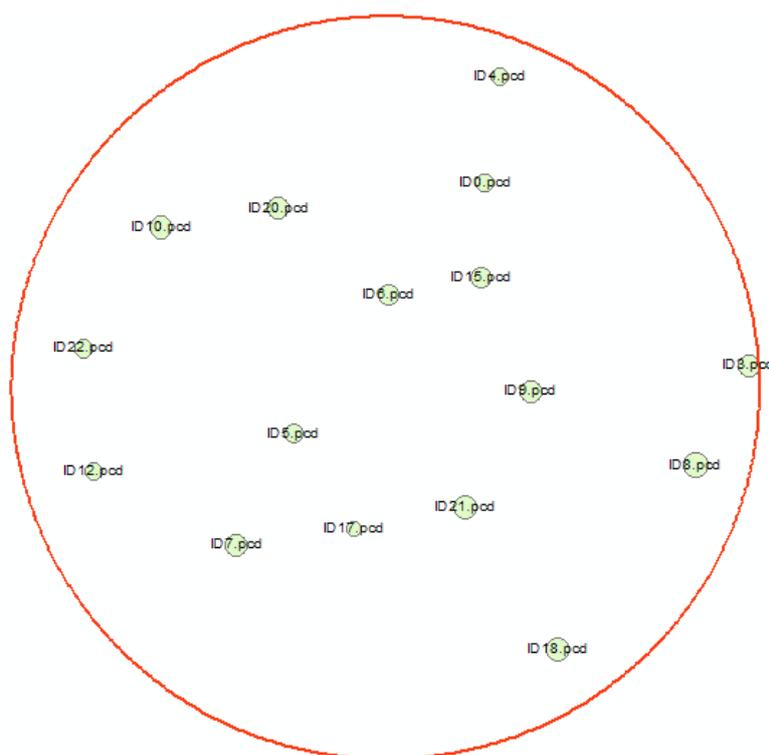


Рис. 6. Сформированный в ГИС подеревный план для радиальной пробной площади
Fig. 6. Tree plan for a radial trial plot generated in GIS

Таблица 1. Сравнение диаметров, полученных по образам деревьев
и измеренных в натуре мерной вилкой

Table 1. Comparison of diameters obtained from tree images
and measured in nature with a measuring fork

Идентификатор образа Image ID	Диаметр, определённый традиционным способом, см Diameter, determined by a traditional way, cm	Диаметр, определённый по облаку, см Diameter determined by cloud, cm	Абсолютное отклонение, см Absolute deviation, cm	Относительное отклонение, % Relative deviation, cm
ID9.pcd	30	29	-1,0	-3,33
ID0.pcd	26	24	-2,0	-7,69
ID10.pcd	30	30	0,0	0,00
IdentifierID12.pcd	23	24	1,0	4,35
ID15.pcd	26	25	-1,0	-3,85
ID17.pcd	20	20	0,0	0,00
ID18.pcd	31	29	-2,0	-6,45
ID20.pcd	29	28	-1,0	-3,45
ID21.pcd	32	33	1,0	3,13
ID22.pcd	25	23	-2,0	-8,00
ID3.pcd	30	29	-1,0	-3,33
ID4.pcd	22	24	2,0	9,09
ID5.pcd	26	26	0,0	0,00
ID6.pcd	28	27	-1,0	-3,57
ID7.pcd	30	30	0,0	0,00
ID8.pcd	33	31	-2,0	-6,06

Таблица 2. Сравнение диаметров, полученных по образам деревьев и измеренных в натуре мерной вилкой

Table 2. Comparison of diameters obtained from tree images and measured in nature with a measuring fork

Идентификатор образа Image ID	Высота дерева, определённая по образу, м Tree height determined by image, m	Высота дерева, измеренная SUUNTO PM-5, м Tree height measured SUUNTO PM-5, m	Абсолютное отклонение, м Absolute deviation, m	Относительное отклонение, % Relative deviation, %	Высота дерева, измеренная электронным теодолитом DT405L, м Tree height measured by electronic theodolite, DT405L, m	Абсолютное отклонение, м Absolute deviation, m	Относительное отклонение, % Relative deviation, %	Высота дерева, измеренная Vertex м Tree height measured by Vertex, m	Абсолютное отклонение, м Absolute deviation, m	Относительное отклонение, % Relative deviation, %
ID9.pcd	20,08	20,82	0,74	3,69	20,32	0,24	1,20	19,81	-0,27	-1,34
ID0.pcd	18,45	18,17	-0,28	-1,39	18,56	0,11	0,55	18,33	-0,12	-0,60
ID10.pcd	20,62	20,53	-0,09	-0,45	20,63	0,01	0,05	20,33	-0,29	-1,44
ID12.pcd	18,97	18,85	-0,12	-0,60	19,06	0,09	0,45	18,89	-0,08	-0,40
ID15.pcd	20,16	20,38	0,22	1,10	20,34	0,18	0,90	20,06	-0,1	-0,50
ID17.pcd	20,42	20,16	-0,26	-1,29	20,68	0,26	1,29	20,31	-0,11	-0,55
ID18.pcd	19,61	20,1	0,49	2,44	19,86	0,25	1,25	19,64	0,03	0,15
ID20.pcd	19,35	19,29	-0,06	-0,30	19,74	0,39	1,94	19,22	-0,13	-0,65
ID21.pcd	18,1	18	-0,1	-0,50	18,28	0,18	0,90	17,98	-0,12	-0,60
ID22.pcd	18,17	18,21	0,04	0,20	18,34	0,17	0,85	18,42	0,25	1,25
ID3.pcd	16,61	17,2	0,59	2,94	16,92	0,31	1,54	16,83	0,22	1,10
ID4.pcd	19,08	19,43	0,35	1,74	19,28	0,2	1,00	19,15	0,07	0,35
ID5.pcd	20,3	20,86	0,56	2,79	20,27	-0,03	-0,15	20,26	-0,04	-0,20
ID6.pcd	19,72	19,9	0,18	0,90	20,1	0,38	1,89	19,64	-0,08	-0,40
ID7.pcd	19,29	19,06	-0,23	-1,15	19,38	0,09	0,45	19,07	-0,22	-1,10
ID8.pcd	19,18	19,57	0,39	1,94	19,43	0,25	1,25	19,41	0,23	1,15

составляют не более чем 1,5%. Отклонения от измерений при помощи теодолита DT405L, также показывают сравнительно небольшие отклонения, не превышающие 2%.

Таким образом, результаты этого исследования свидетельствуют о том, что метод измерения высоты деревьев по образам деревьев, полученным по данным лазерного сканирования, дают результаты с небольшими отклонениями. Это подтверждает надежность и применимость этих методов в геодезических и биологических исследованиях.

По представленным в таблицах результатам можно сделать вывод о том, что точность определения таксационных параметров по трехмерной измерительной сцене можно выполнять измерение диаметров и высот древостоя с требуемыми точностями – ступень толщины для диаметра на высоте 1,3 метра и 10% от средней высоты деревьев на выделе для определения высот.

Выводы

В результате исследования была разработана методика формирования трехмерной измерительной сцены радиальных пробных площадей постоянного радиуса для решения задач лесного сектора с использованием мобильного лазерного сканера, с последующей обработкой результатов в свободно распространяемом ПО Cloud Compare и 3D-Forest.

Апробация метода производилась на радиальной пробной площади, заложенной сотрудниками ФГБОУ ВО «Брянского государственного инженерно-технологического университета» в модельном сосновом насаждении. На изучаемом объекте было получено плотное облако точек, в дальнейшем ставшее основой для построения трехмерной измерительной видео сцены. Трехмерная видео сцена была обработана в специальном программном обеспечении с целью определения таксационных параметров для каждого

деревя на радиальной площади и построении для нее подеревного плана.

Была произведена верификация полученных измерений таксационных параметров по трехмерной измерительной сцене в результате натурных измерений, подтвердившая валидность получаемых результатов.

Следует отметить, что из-за специфики выбранной локации для эксперимента (чистые насаждения) проблематика автоматизированного определения породы наподдеревом уровне осталась неизученной, однако в дальнейших исследованиях предполагается по данной тематике использовать нейросетевое дешифрирование по комбинации «образ плюс текстура».

Список использованных источников

1. Позднякова Ю.С., Подгорный Я.Б. Применение ГИС – технологий для анализа состояния лесного хозяйства // Актуальные исследования. 2021. № 36 (63). С. 24-26. URL: <https://apni.ru/article/2883-primenenie-gis-tekhnologij-dlya-analiza-sost>
2. Шайтура С.В., Васкина М.Ю. Комплексная цифровая модель мониторинга района // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 4. С. 71-76.
3. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с. ISBN978-5-91522-125-2
4. Шайтура С.В., Васкина М.Ю. Мониторинг земель районов Дальнего Востока // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2020. № 1. С. 28-33.
5. Шарипова Л.И. Мониторинг леса // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 4-3 (72). С. 140-144.
6. Ibrahim A.A., Koubaily E.K., Thabeet A.M. Monitoring cedruslibani forests conservation status in the syrian arab republic using geospatial technologies // Vesting of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2021. № 2 (50). С. 5-12.
7. Белов М.А., Шляхова М.М. Использование данных воздушного лазерного сканирования для решения задач лесного хозяйства // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопрограммное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2023. № 1. С. 62-66.
8. Миронова Ю.Н. Использование геоинформационных систем в лесном хозяйстве и лесной промышленности // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9. № 1, порядковый номер 4 (электронный журнал)
9. Ershov D.V., Sochilova E.N. Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia according to remote monitoring data 2021 // Forest Science Issues. 2023. Т. 6. № 1. С. 1-14.
10. Жирнова К.А. Знакомство с принципом работы лазерного сканера ZENMUSE L1 / Иваныш А.В., Ядрышников Ф.М., Нурмахаметов В.Р., Митрофанов Е.М., Фролов И.И. // Славянский форум. 2022. № 1 (35). С. 333-339.
11. Урасова А.А., Глезман Л.В., Федосеева С.С. Анализ факторов развития рынка беспилотных летательных аппаратов в сельскохозяйственной промышленности // Экономика промышленности

Дополнительно специально установленное в исследовании ограничение на свободно распространяемое ПО упрощает применение разработанной технологии, однако не позволяет использовать в процессе обработки видеосцены некоторые специальные функции, реализованные в платных программных решениях.

Предложенная методика позволяет создавать измерительные трехмерные сцены для радиальной пробной площадей постоянного радиуса. Трёхмерное моделирование в лесном секторе позволяет автоматизировать процесс определения таксационных параметров и упрощает процесс формирования картографического материала.

Reference

1. Pozdnyakova Yu.S., Podgorny Ya.B. Application of GIS technologies for analyzing the state of forestry // Current research. 2021. No. 36 (63). P. 24-26. URL: <https://apni.ru/article/2883-primenenie-gis-tekhnologij-dlya-analiza-sost>
2. Shaitura S.V., Vaskina M.Yu. Integrated digital terrain model // Ecology of urbanized territories. 2019. No. 4. P. 71-76.
3. Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P. Monitoring and forecasting of natural disasters. Moscow, 2009. 692 p.
4. Shaitura S.V., Vaskina M.Yu. Monitoring of lands in the Far East // Land management, cadastre and land monitoring, 2020, No. 1, pp. 28-33.
5. Sharipova L.I. Forest monitoring // Current scientific research in the modern world. 2021. No. 4-3 (72). P. 140-144.
6. Ibrahim A.A., Koubaily E.K., Thabeet A.M. Monitoring cedruslibani forests conservation status in the Syrian Arab republic using geospatial technologies // Vesting of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2021. No. 2 (50). P. 5-12.
7. Belov M.A., Shlyakhova M.M. Using airborne laser scanning data to solve forestry problems // Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate assessment, ecology, technological solutions. 2023. No. 1. P. 62-66.
8. Mironova Yu.N. Use of geographic information systems in forestry and forest industry // Waste and resources. 2022. V. 9. No. 1.
9. Ershov D.V., Sochilova E.N. Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia according to remote monitoring data 2021 // Forest Science Issues. 2023. V. 6. No. 1. P. 1-14.
10. Zhirnova K.A. Introduction to the operating principle of the ZENMUSE L1 laser scanner/ Ivanysh A.V., Yadryshnikov F.M., Nurmakhmetov V.R., Mitrofanov E.M., Frolov I.I. // Slavic Forum. 2022. No. 1 (35). P. 333-339.
11. Urasova A.A., Glezman L.V., Fedoseeva S.S. Analysis of market development factors for unmanned aerial vehicles in the agricultural industry. Industrial Economics / Russian Journal of Industrial Economics. 2023;16(3):263-274. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-3-263-274>

/Russian Journal of Industrial Economics. 2023;16(3):263-274.
<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-3-263-274>

12. Kremena S., Shaytura S.V. Using the terrestrial laser scanning technology for detection of cracks in rock massifs // Slavic Forum. 2021. No. 1 (31). P. 241-247.

13. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. Site security system with 3d imaging – conference paper // CEUR Workshop Proceedings. 2021. No. 3035. P. 176.

14. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. Site security system with 3D imaging – Conference Paper CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3035, P. 176-182

15. Шайтура С.В. Инфраструктура пространственных данных для цифрового двойника лесной экосистемы / Митрофанов Е.М., Жаров В.Г., Феоктистова В.М. и др. // Дизайн и технологии. 2022. № 91-92. С. 160-168.

16. Сумзина Л.В., Шайтура С.В. Геоинформационные сервисы инфраструктуры пространственных данных. Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2018. № 9. С. 90-97.

Об авторах

Сергей Владимирович Шайтура, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-5621-5460>; swshaytura@gmail.com

Наталья Сергеевна Шайтура, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель; <https://orcid.org/0000-0002-9422-910X>; n.shaytura@rgau-msha.ru

Евгений Михайлович Митрофанов, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0003-1957-7638>; seferok@mail.ru,

Александр Сергеевич Мухин, канд. с.-х. наук, доцент; a.s.muxin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2130-994X>

Сергей Михайлович Устинов, системный инженер-аналитик; <https://orcid.org/0009-0007-1733-7952>; Serega32br@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. выполнили экспериментальные и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 18.12.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 14.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 14.02.2024

12. Kremena S., Shaytura S.V. Using the terrestrial laser scanning technology for detection of cracks in rock massifs // Slavic Forum. 2021. No. 1 (31). P. 241-247.

13. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. Site security system with 3d imaging – conference paper // CEUR Workshop Proceedings. 2021. No. 3035. P. 176.

14. Shaytura S.V. Site security system with 3D imaging / Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. / Conference Paper CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3035, P. 176-182

15. Shaitura S.V. Spatial data infrastructure for a digital twin of a forest ecosystem / Mitrofanov E.M., Zharov V.G., Feoktistova V.M. // Design and technology. 2022. No. 91-92(133-134). P. 160-168.

16. Sumzina L.V., Shaitura S.V. Geoinformation services of spatial data infrastructure – Supplement to the journal News of Universities. Geodesy and aerial photography. Collection of articles based on the results of the scientific and technical conference. – 2018. – No. 9. – P. 90-97.

About the authors

Sergey V. Shaitura, CSc (Eng), associate professor, <https://orcid.org/0000-0002-5621-5460>; swshaytura@gmail.com

Natalya S. Shaitura, CSc (Phys-Math), senior lecturer2 <https://orcid.org/0000-0002-9422-910X>; n.shaytura@rgau-msha.ru

Evgeniy M. Mitrofanov, CSc (Tech), associate professor, <https://orcid.org/0000-0003-1957-7638>; seferok@mail.ru

Alexander S. Mukhin, CSc (Agro), associate professor3, a.s.muxin@gmail.com

Sergey M. Ustinov, systems CSc (Agro), engineer-analyst, Serega32br@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1733-7952>

Shaitura S.V., Shaitura N.S., Mitrofanov E.M. Mukhin A.S., Ustinov S.M. carried out experimental and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.