

УДК 528.721.221.6

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-32-41

Оценка параметров деревьев на основе данных воздушного лазерного сканирования в смешанных лесах Среднего Предуралья

А. А. Бурдин¹, Д. А. Богатырев¹, А. В. Тарасов¹, С. В. Пьянков^{✉1}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация

e-mail: pyankovsv@gmail.com

Аннотация. В статье представлены первые результаты подеревной оценки характеристик древостоев (количества, высоты и диаметра деревьев) в смешанных лесах Среднего Предуралья с использованием данных воздушного лазерного сканирования (ВЛС). На примере участка смешанного леса в Березовском районе Пермского края площадью 2,52 га выполнен сплошной пересчет деревьев на местности, а также проведена съемка с беспилотного воздушного судна (БВС) воздушным лазерным сканером (лидаром). На основе полученного облака точек средствами пакета LidR выполнены сегментация и идентификация вершин деревьев. В результате сегментации на исследуемом участке по данным ВЛС выделено 962 дерева, что на 10 % меньше их реального количества. Пропуски обусловлены сложностью обработки участков с высокой плотностью полога и наличием деревьев малой высоты. Построены линейные регрессионные модели для оценки высоты и диаметра деревьев на основе данных ВЛС. Среднеквадратичная ошибка составила 1,5 м для высоты и 6,1 см для диаметра деревьев. Полученные данные могут служить основой для дальнейшего улучшения моделей, а также подтверждают целесообразность изучения и применения данной технологии для подеревной таксации.

Ключевые слова: лесная таксация, беспилотный летательный аппарат, воздушное лазерное сканирование, сегментация, высота и диаметр деревьев

Для цитирования:

Бурдин А. А., Богатырев Д. А., Тарасов А. В., Пьянков С. В. Оценка параметров деревьев на основе данных воздушного лазерного сканирования в смешанных лесах Среднего Предуралья // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 4. – С. 32–41. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-32-41

Введение

Оценка таксационных параметров древостоев является одним из необходимых этапов работ при отводе лесных участков, предназначенных под рубку. Традиционная методика инструментальных измерений при таксации лесосек регламентируется приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 17.10.2022 № 688. – М., 2022. – 50 с.). Данный способ сводится к получению качественных и количественных характеристик участка, в первую очередь объема заготавливаемой древесины. При пло-

щади лесосеки менее 3 га производится сплошной пересчет всех деревьев, при большей площади закладывается ленточный пересчет или реласкопические площадки. Результаты пересчета записываются в переучетную ведомость. При этом определяются диаметры ствола на высоте 1,3 м, высота деревьев, породный состав, полнота и прочие характеристики, указываемые в таксационном описании лесосеки. Погрешность при определении объема древесины и породного состава не должна превышать 10 %. Определение многих характеристик производится глазомерным способом, что влечет за собой неточности, следствием которых может стать нару-

шение лесного законодательства и дополнительные расходы для предприятий, занимающихся лесозаготовкой. В связи с этим растет актуальность разработки альтернативных методов таксации лесосек с применением беспилотных воздушных судов (БВС) с различной нагрузкой, в частности с мультиспектральными камерами и воздушными лазерными сканерами (лидарами).

В России при таксации леса применяются только материалы аэрофото- или космической съемки с детальностью от 2,5 м на пиксель, снятые в вегетационный период и содержащие набор спектральных каналов видимого и ближнего ИК-диапазонов (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 510 от 05.08.2022. – М., 2022. – 21 с.) Эти нормативы относятся только к проведению лесоустройства, тогда как при отводе лесосек данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) не задействованы. Между тем в мировой практике при решении этой задачи широко применяется как мультиспектральная съемка с БВС, так и воздушное лазерное сканирование (ВЛС). Основным преимуществом последнего является высокая плотность и проникающая способность лазерных импульсов, что позволяет построить высокодетальную трехмерную модель рельефа и насаждений в виде облака точек и определить с приемлемой точностью основные таксационные характеристики: высоту, размеры кроны дерева, полноту насаждений – и рассчитать разными способами запас древесины.

Данные ВЛС уже стали информационной основой мониторинга и инвентаризации лесов во многих странах мира. Изначально для задач инвентаризации лесов использовался подход, основанный на выделении однородных площадей, близких по характеристикам к таксационным выделам (area-based approach). Опыт его применения рассматривается в ряде публикаций [1, 2]. В последующие годы совершенствование лидаров и повышение плотности точек лазерного сканирования позволило развивать методы, основанные на идентификации отдельных деревьев по данным ВЛС. Такие алгоритмы предпола-

гают на первом этапе группировку точек, которые соответствуют отдельным деревьям или их группам – так называемую вокселизацию. Затем вершины деревьев выявляются на основе идентификации локальных максимумов высоты или выпуклости [3], с помощью методов «подгонки формы» (shape fitting) [4] или с помощью кластеризации [5]. В работе [6] предлагаются различные стратегии обработки данных ВЛС для идентификации отдельных деревьев в сложных лиственных насаждениях, включая методы на основе облака точек и методы уточнения с помощью пространственной кластеризации. Более современные алгоритмы используют сверточные нейронные сети для работы с облаками точек, такие как PointNet [7]. Характерные значения точности детектирования отдельных деревьев в лесном массиве составляют порядка 0,6–0,75 (по показателю F-меры), причем число пропусков чаще превышает число ложных детектирований, так как пропускаются относительно низкие и тонкие деревья, вклад которых в запас насаждения невелик. Точность измерения высоты деревьев находится на уровне десятков сантиметров [8]. В работе [9] была достигнута точность определения высоты в пределах 0,2 м, и количества деревьев на уровне 90 %.

В России воздушное лазерное сканирование (ВЛС) зарекомендовало себя как высокоточный и эффективный метод для оценки таксационных характеристик лесов. Проведенные исследования подтверждают, что ВЛС позволяет достоверно определять породный состав, густоту, высоту, диаметр деревьев и запас древесины [10]. Используемые методики, основанные на анализе проекций крон и расчетах по стандартным таксационным формулам, показали, что точность полученных данных сопоставима с результатами традиционной глазомерно-измерительной таксации и соответствует требованиям лесоустроительной инструкции [11]. Кроме того, развивается подход к сегментации крон деревьев по изображениям, полученным с БВС, с помощью нейронных сетей, что открывает дополнительные возможности для автоматизированной инвентаризации и мониторинга лесных территорий [12].

В целом данное направление исследований в мире активно развивается на фоне повышения как доступности самих данных ВЛС, так и развития новых алгоритмов их обработки. Однако специфика его применения к сложным насаждениям (смешанным, разновозрастным, с различными проявлениями антропогенного воздействия в виде разновозрастных вырубок), характерным для Пермского края, безусловно, требует дополнительных исследований.

В настоящей работе рассматриваются первые результаты оценки характеристик отдельных деревьев в лесном массиве по данным ВЛС на территории Пермского края. Целью ее является сопоставление оценки высоты и диаметра деревьев по данным ВЛС и полевых измерений для смешанных лесов Среднего Предуралья.

Характеристика участка и полевые работы

Для закладки эталонов и сверки данных был выбран участок в Березовском районе Пермского края (57.783N 57.593E). Площадь участка 2,52 га, формула состава, исходя из таксации, проведенной в 2024 г., – 7ЛП1Б1Е1П. Насаждения имеют следующие характеристики (табл. 1). Средний по участку запас древесины составляет 200 м³/га, полнота насаждений 0,5 – неравномерная, подрост – ель возрастом 15 лет. Данный участок хорошо подходит для изучения, так как имеет свежие материалы лесоустройства, находится недалеко от дороги, имеет неравномерный состав, лесной участок подходит под возраст рубки и отнесен к классу спелых и перестойных насаждений.

Таблица 1

Характеристики лесных насаждений

Порода дерева	Возраст (лет)	Средняя высота (H, м)	Средний диаметр ствола (D, см)	Объем на участке (V, м ³)	Количество деревьев на участке	Количество сухостоя	H (м)	D (см)
Липа	65	22	24	352	567	0	23	26
Береза	65	20	20	50	264	6	19	19
Ель	80	21	24	51	151	7	24	35
Пихта	80	18	20	50	65	31	20	35/24
Ива	–	–	–	–	17	0	16	15

Для данного участка был выбран метод сплошного перечета стоящих на корню деревьев, подходящих под заготовку. Помимо основных характеристик, таких как порода, высота, диаметр, были определены координаты ствола каждого дерева с целью дальнейшего сравнения сегментации, полученной по облаку точек ВЛС. Первым шагом было установление границ отведенного участка, в качестве начальной точки локальной системы координат выбран квартальный столб с известными координатами в системе WGS-84. После определения границы участка выполнен сплошной пере́чет деревьев. Каждому дереву присвоен номер в пере́четной ведомости, координаты деревьев получены с помощью GNSS станции D-RTK-2 (рис. 1). Диаметр деревьев измерен мерной вилкой (шаг вилки 2 см), высота измерена у деревьев, вершина кроны которых находилась в прямой видимости. В пере́четную ведомость не включены деревья диаметром менее 12 см, а также поваленные деревья. Сухостойные де-

ревья внесены в пере́четную ведомость отдельной строкой. Учетные деревья за границами участка в дальнейшем были исключены из пере́чета. С помощью сортиментных и товарных таблиц для равнинных лесов Урала были установлены разряды высот деревьев и в дальнейшем вычислены объемы каждого дерева на лесном участке (табл. 2).



Рис. 1. Съёмка участка

Таблица 2

Объем деревьев на лесном участке

Порода дерева	Разряд вы- сот	Объем ствола в коре (м. куб.)
Липа	1	385
Береза	3	82
Ель	5	172
Пихта	3	31

Суммарный объем на участке 670 м³/га, запас – 265 м³/га, полнота 0,6, а формула породного состава 6ЛП1Б3Е+П. Сравнив эти характеристики с данными таксационных описаний лесоустройства, можно заметить превышение объема на 25 %, а также увеличение доли хвойных пород в составе. Стоит отметить, что сплошной пересчет является более точным, чем таксация, так как расчет характеристик производится у каждого дерева, что в дальнейшем даст возможность более корректно проводить сравнение с данными ВЛС

Для съемки участка применялись два БВС типа «квадрокоптер» DJI Matrice 350 RTK и DJI Mavic 3 Multispectral. Первый представляет собой промышленный БВС с установленным на него сканером LiDAR Zenmuse L2. Второй несет на себе только мультиспектральную камеру, снимающую в трех видимых и двух ИК-каналах. При съемке использована GNSS станция D-RTK-2 для более точного позиционирования [13]. Так как БВС DJI Matrice 350 и подвес LiDAR Zenmuse L2 совместимы, процесс съемки и обработки является более оперативным. Данный подвес установлен на трехосевом стабилизаторе, что позволяет сканировать не только в надири, но и под разными углами.

Запуск БВС выполнен с открытой площади в лесу по заранее записанному полетному заданию. Съемка ВЛС выполнена с высоты 150 м, боковое перекрытие между пролетами составляло 60 %, съемка велась в надири, скорость полета 10 м/с, плотность выходного облака точек 200 т/м². Стоит отметить и интервал съемки: в среднем полет длится не более 30 мин. Высокая точность геопозиционирования (1–2 см) определяется установленной базовой станцией RTK, которая передает дифференциальные поправки на

БВС. Аналогичным образом были построены и выполнены полетные задания для Mavic 3 Multispectral. Съемка выполнена с размером пиксела 30 см, продольным перекрытием снимков 80 %, поперечным перекрытием 70 % скоростью полета 15 м/с.

Данные в процессе съемки записаны на внутренний накопитель и содержат в себе файлы записи облака точек, траекторий, фотографий и координат базовой станции, которые в дальнейшем интерпретируются в соответствующем ПО.

После завершения съемки, в камеральной части работы выполнен накидной монтаж снимков в мозаичное покрытие. Исходные фотографии имеют три канала в высоком разрешении RGB, и четыре канала мультиспектральной съемки: RED, GREEN, RED EDGE, NIR. На выходе создан ортофотоплан формата Geotiff с семью спектральными каналами.

Работа с данными LiDAR включает несколько этапов. Изначальные данные с LiDAR Zenmuse L2 содержатся в форматах LDR, IMU, RTB, RTK, CLI и фотографиях. Для их обработки и конвертации в единый формат LAS использовано ПО DJI Terra [14]. Оно позволяет выполнить уравнивание траектории полета в заданной системе координат, и на основе множества пролетов получить единое выровненное облако точек. После обработки получено облако точек LAS с траекториями полета. Следующим этапом была обработка файлов LAS и траекторий полета в ПО Lidar360. На данном этапе были выделены перекрытия, удалены ошибочно записанные точки и точки шумов, выполнено разбиение облака точек на сегменты с установленной буферной зоной. В итоге получен набор данных, готовый для дальнейшей тематической обработки, а именно сегментации деревьев и определения таксационных характеристик каждого дерева.

Оценка характеристик деревьев по данным ВЛС

Для обработки данных был выбран пакет LidR, реализованный в среде языка программирования R [15]. На начальном этапе произве-

дена загрузка и проверка плотного облака точек воздушного лазерного сканирования (ВЛС). Следующим шагом является классификация точек земли с целью дальнейшего построения цифровой модели местности (ЦМР). Среди протестированных методов классификации, таких как Progressive Morphological Filter (PMF), Cloth Simulation Function (CSF) и Multiscale Curvature Classification (MCC), метод CSF, при стандартных параметрах, показал лучшие результаты, обеспечивая минимальное количество ошибок при определении точек земли (рис. 2).

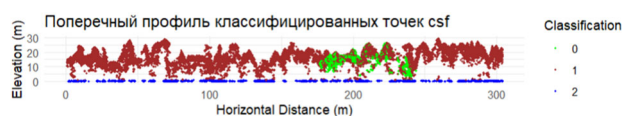


Рис. 2. Поперечный профиль через облако точек, классифицированных методом CSF

ЦМР по точкам была построена с использованием алгоритма обратного взвешивания расстояния (ОВР) с пространственным разрешением 0,5 м. Нормализация облака точек проводилась относительно построенной ЦМР, однако для повышения точности применялась нормализация непосредственно относительно исходного облака точек, что позволило избежать систематических ошибок. Для построения цифровой модели лесного полога (ЦМЛП) был использован алгоритм «point to raster» с размером пикселя 0,5 м, при этом производились интерполяция пустых пикселей и последующее сглаживание.

Индивидуальное обнаружение деревьев – это процесс пространственного определения местоположения деревьев и извлечения метрик из данных ВЛС. Сегментация отдельных деревьев – это процесс индивидуального разграничения обнаруженных деревьев по кронам. Для определения отдельных деревьев была написана функция для фильтра локального максимума с учетом переменного размера окна. В реальности в одной сцене могут присутствовать деревья переменного размера, что приводит к неоптимальным результатам. Чтобы решить эту проблему, в нашем случае необходим размер окна, который под-

страивается под высоту точек в плотном облаке. Точки с высотой менее 10 м обрабатываются с использованием окна размером 2 м, тогда как для точек с высотой более 20 м применяется окно размером 4 м. Для точек с высотой от 10 до 20 м размер окна определяется в соответствии с нелинейной зависимостью, которая учитывает высоту точек в плотном облаке. Этот подход обеспечил точное разделение крон деревьев даже в условиях изменяющейся плотности полога – алгоритм верно определил 962 дерева, что на 10 % меньше реального количества. Из-за недостаточной точности наземных данных привязка по деревьям не производилась. В рамках сегментации отдельных деревьев был выбран алгоритм Dalponte2016 [16]. Выбор обоснован наиболее точным определением крон деревьев. В каждом сегменте рассчитаны стандартные метрики высот (рис. 3). Трехмерная визуализация сегментированных деревьев показана на рис. 4. В результате по данным ВЛС идентифицировано 962 дерева, что на 10 % меньше, чем по данным полевых измерений.

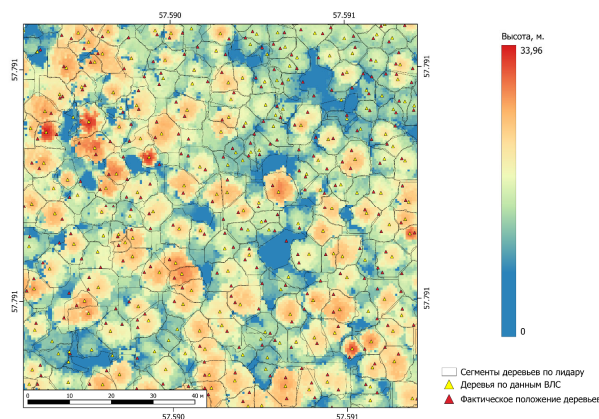


Рис. 3. Результат индивидуального определения и сегментации деревьев



Рис. 4. Визуализация отсегментированных деревьев

При построении линейной регрессионной модели для оценки высоты деревьев (H) и диаметра деревьев на высоте 1,3 м (D), необходимо из набора метрик, полученных из данных ВЛС, идентифицировать предикторы, которые в наибольшей степени объясняют изменчивость H и D по проверочным данным (результатам наземной съемки деревьев). Для этого в ArcGIS 10.8 с помощью инструмента «пространственное соединение» были объединены полученные сегменты и точки с данными, полученными при полевом обследовании. При попадании нескольких фактических точек деревьев в сегмент были выбраны точки с максимальным значением высоты. Для поиска наиболее информативных метрик рассчитана корреляционная матрица. На основе анализа корреляций отобраны наиболее значимые предикторы из числа данных ВЛС: $z_{\max}$ (высота верхушки дерева) и zq_{80-95} (процентили высот деревьев, выделенных по данным ВЛС) для моделирования H и D соответственно. Было решено учитывать метрики с со значениями коэффициентов корреляции для H от 0,84 и для D от $> 0,65$. По выбранным метрикам были построены линейные регрессионные модели предсказания H и D . Произ-

веден анализ ошибок, точности и коэффициентов регрессии, дающих значимый положительный вклад в оценку характеристик.

Результаты

Модель для предсказания H обладает высокой объясняющей способностью ($R^2 = 0,82$), подтверждая, что 82 % изменчивости высоты объясняется предикторами (табл. 3). Значимыми факторами являются максимальная высота $z_{\max}$ ($p = 0,0004$) и 95-й процентиль высот zq_{95} ($p \approx 0,054$), в то время как zq_{80} , zq_{85} и zq_{90} не оказали значимого влияния. Остатки модели распределены нормально, среднеквадратическая ошибка составляет 1,57 м, что можно считать удовлетворительным результатом.

Модель для предсказания D объясняет 62 % изменчивости диаметра ($R^2 = 0,62$), что ниже по сравнению с моделью для высоты, указывая на необходимость её улучшения. Значимыми предикторами оказались $z_{\max}$ ($p = 0,0057$), имеющий прямую зависимость с диаметром и 85-й процентиль высот zq_{85} ($p = 0,036$), имеющий обратную зависимость. Остальные предикторы (zq_{80} , zq_{90} , zq_{95}) не значимы.

Таблица 3

Результаты линейных моделей

Метрика	H, м	D, см
R^2	0,82	0,62
Среднеквадратическая ошибка	1,56	6,11
Коэффициенты регрессии	(Intercept)=3,61 $z_{\max}=0,40$ $zq_{80}=-0,24$ $zq_{85}=-0,02$ $zq_{90}=-0,04$ $zq_{95}=0,70$	(Intercept)=-13,47 $z_{\max}=1,21$ $zq_{80}=0,47$ $zq_{85}=-5,03$ $zq_{90}=2,91$ $zq_{95}=2,13$
Наиболее значимые предикторы	$z_{\max}$ zq_{95}	$z_{\max}$ zq_{85}

Обсуждение и заключение

Основными преимуществами ВЛС в сравнении с традиционными методами таксации лесосек остаются более высокая объективность в сравнении с глазомерной таксацией, а также существенное снижение трудозатрат. Модели для оценки высоты и диаметра деревьев под-

тверждают возможность применения методов ВЛС для мониторинга лесных насаждений с приемлемой точностью. Полученные коэффициент детерминации $R^2 = 0,82$ и среднеквадратическая ошибка (СКО) 1,565 см для модели высоты сопоставимы с результатами в других исследованиях [2, 8], где СКО в определении высоты составила 6,9 см и 4,1 см соответ-

ственно. Модель для оценки диаметра деревьев показала меньшую точность ($R^2 = 0,62$) с СКО = 6,11 см, что может быть связано с большей изменчивостью диаметра в смешанных лесах или недостаточной плотностью данных ВЛС для точного определения этой метрики. Аналогичные проблемы отмечены в работе [5]. В настоящем исследовании использование предикторов z_{max} и z_{q85} показало значимость этих метрик, но выявлена необходимость доработки модели для учета более сложной структуры насаждений.

Кроме того, выявлено расхождение между данными полевого учета и результатами сегментации ВЛС (10 % пропущенных деревьев), что объясняется сложностью обработки участков с высокой плотностью полога и наличием деревьев малой высоты. Подобные выводы согласуются с работой [9], авторы которой также отмечали низкую точность идентификации таких деревьев. Таким образом, для лесов сложной структуры, ха-

рактерных для Среднего Предуралья, необходимы дальнейшие исследования и адаптация алгоритмов сегментации и обработки данных.

Полученные результаты подчеркивают перспективность использования ВЛС в лесной таксации, однако также выявляют необходимость улучшения методов анализа для повышения точности определения всех параметров. Повышение точности результатов возможно как путем определения дополнительных метрик, получаемых из данных ВЛС, например, на уровне вокселя или самого плотного облака точек, так и на основе применения более совершенных алгоритмов (нейронных сетей, случайного леса) для решения задачи.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края в рамках Соглашения от 29.02.2024 № С-26/815.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Junttila V., Maltamo M., Kauranne T. Sparse Bayesian Estimation of Forest Stand Characteristics from Airborne Laser Scanning // *Forest Science*. – 2008. – Vol. 54. – P. 543–552. – DOI 10.1093/forestscience/54.5.543.
2. Kauranne T., Pyankov S., Junttila V., Kedrov A., Tarasov A., Kuzmin A., Peuhkurinen J., Vilikka M., Vartio V.-M., Sirparanta S. Airborne Laser Scanning Based Forest Inventory: Comparison of Experimental Results for the Perm Region, Russia and Prior Results from Finland // *Forests*. – 2017. – Vol. 8. – Art. No. 72. – DOI 10.3390/f8030072. – EDN YVKOIR
3. Anandakumar R., Nidamanuri R., Krishnan R. Individual tree detection from airborne laser scanning data based on supervoxels and local convexity // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2019. – Vol. 15. – Art. No. 100242. – DOI 10.1016/j.rsase.2019.100242.
4. Qian C., Yao C., Ma H., Xu J., Wang J. Tree Species Classification Using Airborne LiDAR Data Based on Individual Tree Segmentation and Shape Fitting // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – Art. No. 406. – DOI 10.3390/rs15020406. – EDN JQTPHE.
5. Li Y., Xie D., Wang Y., Jin S., Zhou K., Zhang Z., Li W., Zhang W., Mu X., Yan G. Individual tree segmentation of airborne and UAV LiDAR point clouds based on the watershed and optimized connection center evolution clustering // *Ecology and Evolution*. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. e10297. – DOI 10.1002/ece3.10297. – EDN ONQZAW.
6. Pu Y., Xu D., Wang H., Li X., Xu X. A New Strategy for Individual Tree Detection and Segmentation from Leaf-on and Leaf-off UAV-LiDAR Point Clouds Based on Automatic Detection of Seed Points // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – Art. No. 1619. – DOI 10.3390/rs15061619. – EDN IFVZZV.
7. Kim D-H., Ko C-U., Kim D-G., Kang J-T., Park J-M., Cho H-J. Automated Segmentation of Individual Tree Structures Using Deep Learning over LiDAR Point Cloud Data // *Forests*. – 2023. – Vol. 14(6). – Art. No. 1159. – DOI 10.3390/f14061159. – EDN NCKHTA.

8. Sparks A. M., Smith A. M. S. Accuracy of a LiDAR-Based Individual Tree Detection and Attribute Measurement Algorithm Developed to Inform Forest Products Supply Chain and Resource Management // *Forests*. – 2022. – Vol 13. – Art. No. 3. – DOI 10.3390/f13010003. – EDN FURWHO.
9. Chen X., Jiang K., Zhu Y., Wang X., Yun T. Individual tree crown segmentation directly from UAV-borne LiDAR data using the PointNet of deep learning // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – Art. No. 131. – DOI 10.3390/f12020131. – EDN BMKOAP.
10. Ковязин В. Ф., Виноградов К. П., Киценко А. А., Васильева Е. А. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // *Изв. вузов. Лесн. журн.* – 2020. – № 6. – С. 42–54. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54. – EDN WGSYHB.
11. Ковязин В. Ф., Пасько О. А., Лепихина О. Ю., Трушников В. Е. Оценка точности инвентаризации лесных земель с применением воздушного лазерного сканирования // *Геодезия и картография*. – 2022. – № 6. – С. 54–63. – DOI 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63.12. – EDN RPJLAJ.
12. Катаев М. Ю., Карташов Е. Ю., Рябухин В. В., Макаров Е. В., Пасько О. А. Методика сегментации изображений беспилотных летательных аппаратов с помощью нейронных сетей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2023. – Т. 20. № 1. – С. 55–66. – DOI 10.21046/2070-7401-2023-20-1-55-66. – EDN ANGNDZ.
13. DJI Enterprise. Matrice 350 RTK // Specs [Электронный ресурс] – URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs>.
14. DJI Enterprise. DJI Terra // [Электронный ресурс] – URL: <https://enterprise.dji.com/dji-terra>.
15. Roussel J. R., Auty D., Coops N. C., Tompalski P., Goodbody T. R. H., Sánchez Meador A., Bourdon J. F., De Boissieu F., Achim A. LidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data // *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Vol 251. – Art. No. 112061. – DOI 10.1016/j.rse.2020.112061 EDN: FFSEVG.
16. Dalponte M., Coomes D.A., Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2016. – Vol. 7. – P. 1236–1245. – DOI 10.1111/2041-210X.12575.

Об авторах

Артём Андреевич Бурдин – ассистент кафедры картографии и геоинформатики.

Данил Артемович Богатырев – магистрант кафедры картографии и геоинформатики.

Андрей Владимирович Тарасов – кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики.

Сергей Васильевич Пьянков – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики.

Получено 19.02.2025

© А. А. Бурдин, Д. А. Богатырев, А. В. Тарасов, С. В. Пьянков, 2025

Assessment of tree parameters based on aerial laser scanning data in mixed forests of the Middle Urals

A. A. Burdin¹, D. A. Bogatyrev¹, A. V. Tarasov¹, S. V. Pyankov¹✉

¹ Perm State University, Perm, Russian Federation
e-mail pyankovsv@gmail.com

Abstract. The initial results of individual tree-level assessment of stand characteristics (tree count, height, and diameter) in mixed forests of the Middle Urals using airborne laser scanning (ALS) data are presented in the article. A complete ground survey was carried out for a sample plot of 2.52

hectares located in Berezovsky District of the Perm region, along with an ALS survey performed with unmanned aerial vehicle (UAV). Based on the acquired point cloud processed using the LidR package, segmentation and identification of tree tops were carried out. As a result of this segmentation, 962 trees were identified within the study area according to ALS data, which is approximately 10% less than their actual number. The discrepancy was attributed to difficulties in processing areas with dense canopy cover and presence of low-height trees. Linear regression models were developed to estimate tree heights and diameters based on ALS data. The RMSE was found to be 1.5 m for tree height and 6.1 cm for tree diameter. These findings provide a foundation for further refinement of the models and validate the feasibility of studying and applying ALS for detailed forest inventory.

Keywords: forest inventory, unmanned aerial vehicle, aerial laser scanning, segmentation, tree height, tree diameter

REFERENCE

1. Junttila, V., Maltamo, M., Kauranne, T. Sparse Bayesian Estimation of Forest Stand Characteristics from Airborne Laser Scanning, *Forest Science*. 2008, 54, 543–552. DOI 10.1093/forestscience/54.5.543.
2. Kauranne, T., Pyankov, S., Junttila, V., Kedrov, A., Tarasov, A., Kuzmin, A., Peuhkurinen, J., Villikka, M., Vartio, V.-M., Sirparanta, S. (2017) Airborne Laser Scanning Based Forest Inventory: Comparison of Experimental Results for the Perm Region, Russia and Prior Results from Finland. *Forests*. 8, 72. DOI 10.3390/f8030072. EDN YVKOIR
3. Anandakumar, R., Nidamanuri, R., Krishnan, R. (2019) Individual tree detection from airborne laser scanning data based on supervoxels and local convexity. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 15, 100242. DOI 10.1016/j.rsase.2019.100242.
4. Qian, C., Yao, C., Ma, H., Xu, J., Wang, J. (2023) Tree Species Classification Using Airborne LiDAR Data Based on Individual Tree Segmentation and Shape Fitting. *Remote Sensing*. 15, 406. DOI 10.3390/rs15020406. EDN JQTPHE.
5. Li, Y., Xie, D., Wang, Y., Jin S., Zhou, K., Zhang, Z., Li, W., Zhang, W., Mu, X., Yan, G. (2023) Individual tree segmentation of airborne and UAV LiDAR point clouds based on the watershed and optimized connection center evolution clustering. *Ecology and Evolution*. Vol. 13. Art. No. e10297 DOI 10.1002/ece3.10297. EDN ONQZAW.
6. Pu, Y., Xu, D., Wang, H., Li, X., Xu, X. (2023) A New Strategy for Individual Tree Detection and Segmentation from Leaf-on and Leaf-off UAV-LiDAR Point Clouds Based on Automatic Detection of Seed Points. *Remote Sensing*. 15, 1619. DOI 10.3390/rs15061619. EDN IFVZZV.
7. Kim, D-H., Ko, C-U., Kim, D-G., Kang, J-T., Park, J-M., Cho, H-J. (2023) Automated Segmentation of Individual Tree Structures Using Deep Learning over LiDAR Point Cloud Data. *Forests*. 14(6), 1159. DOI 10.3390/f14061159. EDN NCKHTA.
8. Sparks, A.M., Smith, A.M.S. (2022) Accuracy of a LiDAR-Based Individual Tree Detection and Attribute Measurement Algorithm Developed to Inform Forest Products Supply Chain and Resource Management. *Forests*. 13, 3. DOI 10.3390/f13010003. EDN FURWHO.
9. Chen, X., Jiang, K., Zhu, Y., Wang, X., Yun, T. (2021) Individual tree crown segmentation directly from UAV-borne LiDAR data using the PointNet of deep learning. *Forests*. 12, 131. DOI 10.3390/f12020131. EDN BMKOAP.
10. Koviazin, V.F., Vinogradov, K.P., Kicenکو, A.A., Vasilieva, E.A. (2020). Airborne Laser Scanning for Refinement of Forest Stand Taxation Characteristics. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, (6), 42–54. DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54. EDN WGSYHB.
11. Koviazin, V.F., Pasko, O.A., Lepikhina, O.Yu., Trushnikov, V.E. (2022). Accuracy Assessment of Forest Land Inventory Using Airborne Laser Scanning. *Geodesy and Cartography*, (6), 54–63) DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63.12. EDN RPJLAJ [in Russian]

12. Kataev, M.Yu., Kartashov, E.Yu., Ryabukhin, V.V., Makarov, E.V., Pasko, O.A. (2023). Method for Segmenting UAV Images Using Neural Networks. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 20(1), 55–66. DOI 10.21046/2070-7401-2023-20-1-55-66. EDN ANGNDZ [in Russian]
13. DJI Enterprise. Matrice 350 RTK *Specs* Retrieved from <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs>.
14. DJI Enterprise. DJI Terra Retrieved from <https://enterprise.dji.com/dji-terra>.
15. Roussel J.R., Auty D., Coops N. C., Tompalski P., Goodbody T. R.H., Sánchez Meador A., Bourdon J.F., De Boissieu F., Achim A. (2021). LidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data *Remote Sensing of Environment*. Vol 251. Art. No. 112061. DOI 10.1016/j.rse.2020.112061 EDN: FFSEVG.
16. Dalponte M., Coomes D.A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data *Methods in Ecology and Evolution*. Vol. 7. P. 1236–1245. DOI 10.1111/2041-210X.12575.

Author details

Artem A. Burdin – assistant, Department of Cartography and Geoinformatics.

Danil A. Bogatyrev – Graduate, Department of Cartography and Geoinformatics.

Andrey V. Tarasov – Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics.

Sergey V. Pyankov – D. Sc., Professor, Head of the Department of Cartography and Geoinformatics.

Received 19.02.2025

© A. A. Burdin, D. A. Bogatyrev, A. V. Tarasov, S. V. Pyankov, 2025