

И.К. Говядин, А.Н. Чубинский

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ КРИВИЗНЫ И ВЫСОТЫ ДЕРЕВЬЕВ

Введение. Устойчивое использование природных ресурсов становится не просто целью, но и необходимостью. Лесная промышленность ищет новые подходы к оценке и использованию древесины. Традиционные методы лесозаготовки, базирующиеся на общих оценках запасов леса и не учитывающие индивидуальные характеристики каждого дерева, постепенно уступают место более современным и технологичным решениям. В этом контексте применение технологий искусственного интеллекта (далее – ИИ) представляет собой мощный инструмент, способный радикально изменить подходы к заготовке древесины, сделав их более устойчивыми и экологически безопасными.

Одной из важнейших задач, стоящих перед лесной отраслью, является точная оценка характеристик каждого дерева, включая его диаметр, высоту, кривизну ствола и др. Эти параметры имеют критическое значение для определения качества и объема древесины, которую можно получить с каждого дерева. Традиционные методы сбора данных и оценки часто ограничиваются визуальным осмотром и измерениями, проводимыми вручную, что сопряжено с высокой степенью погрешности и требует значительных трудозатрат.

С развитием технологий ИИ [López-Serrano et al., 2022; Liang, Gadow, 2023; Mishra et al., 2024] появилась возможность автоматизировать процесс сбора и анализа данных о деревьях. Использование алгоритмов для анализа изображений и видео, собранных с помощью дронов или наземных камер, позволяет получить детальные и точные данные о каждом дереве на лесосеке. Это, в свою очередь, открывает путь к созданию трехмерных моделей деревьев, которые могут быть использованы для комплексной оценки их состояния и планирования лесозаготовительных и деревоперерабатывающих работ.

В предыдущей статье [Говядин и др., 2024] рассмотрены методы определения диаметра ствола дерева с использованием ИИ. В настоящей статье предпринята попытка расширить область применения алгоритмов, фокусируясь на изучении параметров, важных для лесозаготовителей и переработчиков древесины. Особенностью данного подхода является его комплексность, стремление не только точно определить физические

параметры деревьев, но и создать их полные трехмерные модели для последующего анализа. Этот подход позволяет не только улучшить качество и точность оценок, но и внести существенный вклад в развитие устойчивых методов лесопользования.

Целью исследования является разработка и апробация комплексной методологии, основанной на применении алгоритмов ИИ, для точного анализа высоты, диаметра у основания, диаметра у вершины, кривизны, объема, площади поверхности ствола. Исследование направлено на решение нескольких взаимосвязанных задач, которые в совокупности позволят значительно повысить эффективность и устойчивость процессов использования лесных ресурсов.

Ряд опубликованных за последние годы работ [Войтов и др., 2023; Лебедев, 2023; Gao, Kan, 2022; Sheng et al., 2022; Buchelt et al., 2024] демонстрирует значительный прогресс в этой области, подчеркивая потенциал ИИ, важность интеграции новейших технологий в процессы управления и оценки лесных ресурсов. Они демонстрируют, как применение ИИ может повысить точность и эффективность сбора данных о лесах, что, в свою очередь, способствует развитию более устойчивых методов лесозаготовки и управления лесными экосистемами [Montaño et al., 2017; Raihan, 2023]. Наши исследования позволяют внести вклад в эту область, расширяя возможности использования ИИ для анализа основных показателей деревьев.

Материалы и методика исследования. Для достижения поставленной цели исследования и решения задач, связанных с анализом деревьев с использованием ИИ, был выбран комплексный подход, включающий сбор данных, разработку и обучение алгоритмов, а также создание и анализ трехмерных моделей деревьев.

Для анализа было собрано более 7600 фотографий и 8 ч видеоматериалов с использованием дронов и наземных камер. Угол съемки варьировался от 45 до 90° для обеспечения полного покрытия стволов деревьев. Сбор данных проводился в лесных массивах Ленинградской области (посёлок Каннельярви) и на территории Ботанического сада СПбГЛТУ. Лесные насаждения в районе Каннельярви представлены преимущественно хвойными породами (сосна обыкновенная, ель европейская) с возрастом деревьев от 50 до 80 лет. Класс бонитета — II–III, тип леса — ельник-черничник. Подрост представлен молодыми елями и соснами, плотность подроста средняя. Травяно-кустарничковый ярус состоит из черники и брусники, его густота умеренная. Съемка проводилась в феврале–марте

2024 г. в условиях хорошей видимости и умеренной облачности. Для минимизации влияния нижних ярусов (подроста и травяно-кустарничкового покрова) использовались алгоритмы фильтрации, позволяющие выделить стволы основных деревьев.

Выполнен тщательный сбор изображений деревьев со всех сторон, чтобы обеспечить комплексное покрытие и достаточное количество перекрытий между кадрами. Этот процесс обеспечил надежную основу исследования.

Для анализа собранных изображений и создания моделей использовались специализированные программные пакеты и библиотеки, такие как Open CV (4.10.0) для обработки изображений и PCL (Point Cloud Library, 1.14.0) для работы с облаками точек.

Предварительная обработка данных включала коррекцию изображений, удаление шумов и нерелевантных объектов, а также стандартизацию форматов данных для последующего анализа. Особенностью нашего алгоритма предварительной обработки [Говядин, Каримов, 2023; Говядин и др., 2023] является то, что он специально оптимизирован для работы с фотографиями деревьев, что позволяет эффективно выделять необходимые объекты для анализа и исключать изображения, не соответствующие критериям исследования. Данный алгоритм обрабатывает все материалы в автоматическом режиме, значительно ускоряя процесс подготовки данных к анализу, обеспечивая высокую точность и однородность данных, что критически важно для обучения моделей и последующего анализа.

На этапе обучения использовались алгоритмы глубокого обучения для обработки изображений, включая сверточные нейронные сети (CNN), для выявления и измерения кривизны стволов и высоты деревьев. Обучение моделей происходило на основе аннотированных данных с использованием техник обучения с учителем. Этот подход также применяется в работах [López-Serrano et al., 2022; Sheng et al., 2022], где ИИ используется для автоматического измерения диаметра стволов и инвентаризации лесов. Однако, в отличие от этих исследований, мы фокусируемся на комплексном анализе нескольких параметров деревьев (высота, диаметр, кривизна, объем), что позволяет получить более полную картину состояния лесного массива.

С помощью специализированного программного обеспечения для моделирования были созданы трехмерные модели деревьев на основе анализа фото- и видеоматериалов. Использование данной методики позволило обеспечить высокую точность анализа характеристик деревьев и создать основу для разработки устойчивых методов лесозаготовки с использованием современных технологий [Говядин, 2023].

Результаты исследования. В ходе проведенного исследования разработан и проведена апробация методики для создания моделей деревьев. Достижение высокого уровня реализма и точности в визуализации натуральных объектов позволило нам обеспечить средства для анализа кривизны стволов, высоты деревьев и других параметров, важных для лесозаготовителей.

С использованием специализированного программного обеспечения для обработки изображений был проведён анализ собранных данных, что позволило получить детализированное трёхмерное представление строения деревьев. Облака точек были преобразованы в полигональные сетки, которые составили геометрическую основу для построения моделей. Ключевым аспектом работы стало обеспечение точного отражения полигональными сетками морфологических особенностей деревьев, включая неровности стволов.

Для повышения реалистичности моделей было выполнено текстурирование. На этом этапе текстуры, извлечённые из исходных изображений, были тщательно наложены на полигональные сетки. Этот процесс был критически важен для точного воспроизведения визуальных характеристик деревьев, таких как цвет и текстура коры, форма листьев и другие детали. Полученные модели могут быть использованы для создания цифровой модели леса, обеспечивающей реалистичную визуализацию его структуры и морфометрических характеристик (рис. 1).

На следующем этапе проведён анализ трёхмерных моделей с целью изучения диаметра стволов, их кривизны и других параметров. С использованием разработанных инструментов и методик были выполнены точные измерения, что подтвердило высокую детализацию и достоверность моделей. Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал применения трёхмерного моделирования для анализа физических характеристик деревьев и их дальнейшего использования.

Полученные 3D-модели демонстрируют не только общую форму и размеры деревьев, но и детально отображают кривизну стволов (рис. 2), которую ранее было сложно измерить с высокой степенью точности. Такой подход позволит лесозаготовителям и потребителям точно оценивать объем и качество древесины, а также планировать заготовительные работы с учетом индивидуальных характеристик каждого дерева. Этот подход схож с исследованиями [Montaño et al., 2017; Raihan, 2023], где также используются 3D-модели для оценки биомассы и состояния деревьев, однако в нашем подходе применяется методика для анализа кривизны стволов.



Рис. 1. Пример моделирования на основе измерений ствола дерева на высоте 1,3 метра от комля

Fig. 1. Example of modelling based on measurements of a tree trunk at a height of 1.3 meters from the butt

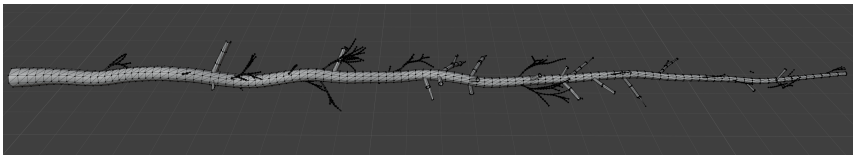


Рис. 2. Пример модели ствола дерева для анализа

Fig. 2. Example of a tree trunk model for analysis

Чтобы вычислить кривизну и сбег, можно применять различные математические и геометрические методы. Например, анализируя изменение

диаметра ствола в разных точках, можно оценить его искривление. Сбег дерева может быть оценен путем сравнения положения центра масс дерева на разной высоте с предполагаемой вертикальной осью.

Подобные программы также позволяют вычислить другие размерные характеристики дерева, такие как высота, объем ствола и площадь поверхности. Эти данные могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Если есть трёхмерная модель ствола дерева, построенная по облаку точек, то можно использовать предложенную формулу для определения кривизны ствола. Однако для этого потребуются провести несколько ключевых этапов преобразования данных и анализа.

Облако точек, полученное с помощью методов фотограмметрии или лазерного сканирования, представляет собой множество точек, которые описывают поверхность дерева, но не напрямую центральную ось ствола. Чтобы применить формулу кривизны, необходимо построить центральную линию ствола — осевую кривую, которая будет представлять общий путь ствола в пространстве.

Методы построения осевой кривой включают:

- Сегментацию и усреднение точек, чтобы найти центральную линию облака точек;
- Использование алгоритмов выделения скелета (например, минимальная оболочка или алгоритм медиальной оси), чтобы найти срединную кривую ствола.

После того как осевая кривая (центральная линия) ствола построена, можно аппроксимировать её функцией, которая задаёт параметры в зависимости от длины ствола. Это может быть, например, полиномиальная функция или сплайн, который плавно проходит через центр каждого сечения ствола. При помощи параметрической кривой $r(t)$, представляющей центральную линию ствола, получаем следующие характеристики:

- Первая производная $r'(t)$: вычисляем касательные векторы вдоль центральной линии ствола;
- Вторая производная $r''(t)$: вычисляем ускорение, которое даёт информацию о том, как меняется направление касательной вдоль ствола.

Используя производные, можно применить формулу для вычисления кривизны:

$$k(t) = \frac{|r'(t) \times r''(t)|}{|r'(t)|^3}, \quad (1)$$

где $r'(t)$ и $r''(t)$ вычисляются численно, если осевая кривая представлена дискретными точками.

На практике процесс выглядит следующим образом:

- сбор облака точек;
- фильтрация и построение оси: необходимо провести фильтрацию данных, удалить шум, после построить осевую линию;
- численное дифференцирование: на основе осевой линии, которая состоит из множества точек, можно применить численные методы для оценки производных. Например, используя метод конечных разностей, оценить первую и вторую производные для каждой точки;
- Вычисление кривизны: формула применяется к каждой точке осевой кривой, что позволяет вычислить локальную кривизну ствола вдоль всей его длины.

Шум в данных может содержать информацию, из-за которой осевая линия может не быть гладкой. Это может потребовать применения фильтров, чтобы сгладить данные. Вычисление производных на основе дискретных точек может быть чувствительным к погрешностям, поэтому используется аппроксимация осевой кривой сплайнами, что делает ее более гладкой.

Использование этой методики на основе облака точек и последующего анализа центральной линии позволяет получить точное представление о форме ствола и его кривизне, чего невозможно достичь при использовании обычных измерительных инструментов. Такой подход даёт возможность автоматизировать процесс оценки кривизны и применять его к большому количеству деревьев, что делает результаты лесозаготовительного производства более точными и устойчивыми.

Таким образом, предложенная формула вполне применима к трехмерной модели дерева, построенной по облаку точек, если осевая линия ствола может быть точно реконструирована и аппроксимирована.

Несмотря на то, что в нашем распоряжении имеется существенно более обширный массив данных, для наглядной демонстрации в рамках исследования мы выбрали 50 деревьев различных размеров и характеристик. Такой выбор позволил показать репрезентативную вариативность кривизны и других параметров, сохранив при этом наглядность представленного материала (табл. 1). Каждый ствол был представлен в виде трехмерной модели, что дало возможность провести комплексный анализ всех ключевых характеристик.

На графике распределения высот деревьев (рис. 3) видно, что высота находится в диапазоне от 15 до 25 м. Средняя высота составляет 20,5 м, что характерно для зрелых деревьев, растущих в благоприятных условиях.

Таблица 1

Анализ ключевых характеристик

Analysis of key characteristics

Идентификатор дерева	Высота дерева (м)	Диаметр у основания (м)	Диаметр у вершины (м)	Средняя кривизна (м ⁻¹)	Объем ствола (м ³)	Площадь поверхности ствола (м ²)
Tree_1	15,52	0,45	0,12	0,0125	2,41	27,8
Tree_2	20,31	0,56	0,24	0,0101	2,2	32,78
Tree_3	20,41	0,5	0,18	0,0087	1,9	28,28
Tree_4	21,37	0,35	0,22	0,014	2,56	28,41
Tree_5	22,26	0,32	0,15	0,0052	2,39	33,15
Tree_6	24,76	0,49	0,23	0,0094	1,71	26,05
Tree_7	20,16	0,31	0,16	0,0041	2,68	22,01
Tree_8	18,23	0,48	0,1	0,0092	2,57	20,43
Tree_9	22,95	0,58	0,24	0,0046	2,73	31,33
Tree_10	17,71	0,47	0,11	0,0053	2,44	29,3
Tree_11	19,39	0,42	0,15	0,0053	2,3	30,56
Tree_12	15,78	0,49	0,24	0,0111	2,04	23,19
Tree_13	15,25	0,44	0,24	0,0122	2,71	22,05
Tree_14	24,63	0,46	0,19	0,0104	2,63	20,22
Tree_15	23,36	0,58	0,19	0,0146	1,56	25,26
Tree_16	21,96	0,42	0,17	0,0081	1,53	28,85
Tree_17	19,09	0,59	0,14	0,0071	1,99	25,88
Tree_18	16,73	0,57	0,15	0,0136	2,55	26,56
Tree_19	16,56	0,36	0,2	0,0065	2,78	33,56
Tree_20	17,5	0,32	0,21	0,0146	1,7	25,22
Tree_21	20,49	0,33	0,22	0,0041	2,27	27,71
Tree_22	22,15	0,31	0,22	0,0147	2	31,75
Tree_23	21,6	0,33	0,11	0,0045	2,76	25,95
Tree_24	17,8	0,5	0,17	0,0138	2,59	29,33
Tree_25	24,55	0,32	0,11	0,0098	2,59	32,94
Tree_26	22,38	0,4	0,18	0,0149	2,11	34,24
Tree_27	20,54	0,55	0,17	0,0048	2,04	22,21
Tree_28	21,12	0,31	0,23	0,0101	1,86	33,9
Tree_29	19,2	0,54	0,15	0,0147	1,57	27,38
Tree_30	17,48	0,38	0,12	0,0098	2,62	23,87

Окончание табл. 1

Идентификатор дерева	Высота дерева (м)	Диаметр у основания (м)	Диаметр у вершины (м)	Средняя кривизна (м ⁻¹)	Объем ствола (м ³)	Площадь поверхности ствола (м ²)
Tree_31	18,56	0,34	0,12	0,0109	2,56	26,89
Tree_32	22,58	0,51	0,21	0,0117	2,8	34,7
Tree_33	15,14	0,49	0,19	0,009	2,8	27,39
Tree_34	16,16	0,56	0,12	0,0109	2,22	24,93
Tree_35	15,46	0,52	0,11	0,0104	2,5	29,5
Tree_36	15,41	0,54	0,21	0,0139	2,73	23,6
Tree_37	23,55	0,38	0,11	0,0045	2,6	21,14
Tree_38	22,04	0,35	0,22	0,0071	1,82	21,93
Tree_39	19,74	0,53	0,21	0,0145	2,09	21,92
Tree_40	15,98	0,54	0,11	0,0138	1,67	22,28
Tree_41	19,92	0,6	0,11	0,009	2,74	22,08
Tree_42	19,73	0,42	0,25	0,0108	2,29	29,61
Tree_43	16,73	0,41	0,16	0,0071	1,8	22,73
Tree_44	19,34	0,53	0,16	0,0061	2,37	25,19
Tree_45	18,99	0,4	0,22	0,0091	2,3	33,45
Tree_46	21,16	0,58	0,24	0,0079	1,97	27,11
Tree_47	21,35	0,56	0,25	0,0104	1,65	30,01
Tree_48	15,45	0,43	0,21	0,0049	2,37	22,58
Tree_49	18,75	0,53	0,16	0,0147	2,18	22,88
Tree_50	21,26	0,53	0,11	0,0148	2,5	20,61

Большинство деревьев имеют высоту, близкую к средней, что свидетельствует о хорошем общем состоянии лесного участка, где они растут. Эти результаты могут также отражать одинаковые возрастные группы или схожие условия роста, такие как уровень освещенности и тип почвы.

Диаметр у основания деревьев изменяется в диапазоне от 0,3 до 0,6 м со средним значением 0,45 м. Большой диаметр у основания указывает на более зрелые и устойчивые деревья. Диаметр у основания имеет значение для оценки общего запаса древесины, так как он определяет основную массу древесины.

Диаметр у вершины варьирует от 0,1 до 0,25 м. Средний диаметр у вершины составляет 0,17 м. Тенденция к сужению к верхушке типична для деревьев, что обеспечивает их устойчивость и баланс. Сужение может

также отражать возрастающее влияние внешних факторов, таких как ветер, который особенно воздействует на вершину [Глухих, Черных, 2020].

Распределение средней кривизны показывает, что кривизна стволов находится в диапазоне от 0,004 до 0,015 м⁻¹ со средним значением 0,009 м⁻¹. Кривизна ствола является важным параметром для оценки качества древесины: чем выше кривизна, тем меньше древесина подходит для прямого использования, такого как производство пиломатериалов и шпона. Небольшая кривизна, наблюдаемая у большинства деревьев, указывает на достаточно ровные стволы, что повышает их ценность для лесозаготовителей. Более высокая кривизна в некоторых деревьях может быть связана с внешними факторами, такими как ветер, асимметричный рост корней или конкуренция с другими деревьями [Глухих, Черных, 2020].

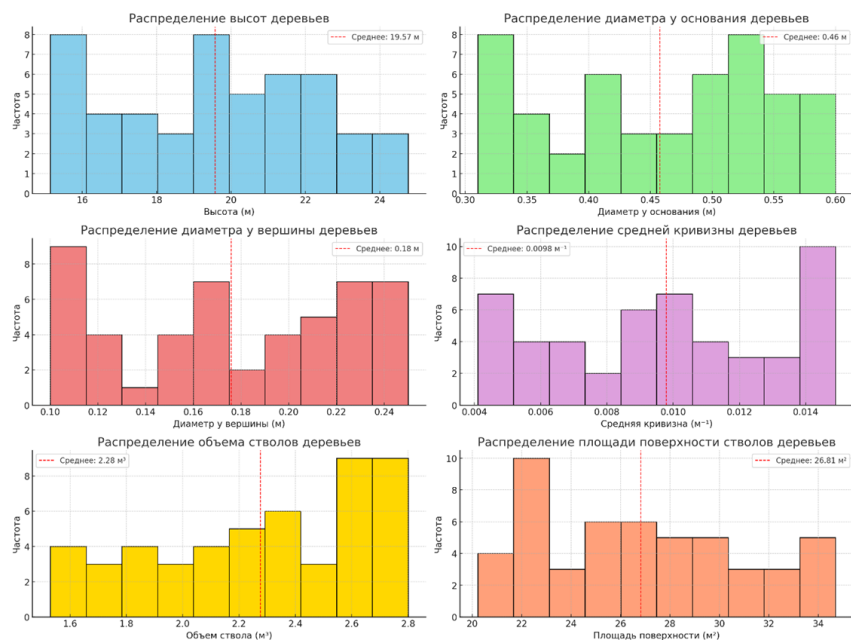


Рис. 3. Графики распределения
Fig. 3. Distribution graphs

Объем стволов деревьев изменяется в диапазоне от 1,5 до 2,8 м³ со средним значением 2,3 м³. Объем ствола является ключевым показателем для оценки количества доступной древесины. Средний объем указывает на

достаточный запас древесины на каждом дереве, что может свидетельствовать о хорошем здоровье деревьев и благоприятных условиях роста. Это также говорит о том, что выбранная выборка деревьев включает деревья среднего размера, которые обеспечивают оптимальный баланс между экологической ценностью и хозяйственной полезностью.

Площадь поверхности стволов варьирует от 20 до 35 м² со средним значением 27,9 м². Площадь поверхности имеет важное значение для процессов газообмена, транспирации и фотосинтеза. Она также служит индикатором общей биомассы дерева. Деревья с большей площадью поверхности обычно имеют больше ветвей и листвы, что повышает их способность к фотосинтезу и способствует их здоровью и росту [Дорофеева, Бонеекая, 2020].

Графики (рис. 3) показывают, что распределение высот, диаметров и других характеристик деревьев в исследуемых насаждениях соответствует ожидаемым для лесных массивов формам: в одновозрастных насаждениях наблюдается распределение, близкое к нормальному, а в разновозрастных — асимметричное или мультимодальное. Это отражает естественную изменчивость структуры древостоев в зависимости от возраста и условий роста. Следует отметить, что сбор материалов проводился в разных лесных массивах, что могло повлиять на вариативность распределений. Отсутствие значительных отклонений от ожидаемых форм распределения может свидетельствовать о хорошем лесохозяйственном управлении и отсутствии серьезных негативных факторов, таких как заболевания или экстремальные погодные условия.

Значительное разнообразие значений кривизны и объемов деревьев может отражать различия в условиях роста, включая воздействие ветра, плотность деревьев в лесу, доступность питательных веществ и освещенность. Это разнообразие также подчеркивает необходимость индивидуального подхода к оценке и планированию лесозаготовительных работ, поскольку каждый участок леса может требовать уникальной стратегии управления.

На основе распределения диаметров и объемов можно сделать вывод, что большинство деревьев в выборке являются зрелыми и готовы к заготовке.

Необходимо учитывать кривизну, так как более кривые стволы требуют другой стратегии использования или переработки. Низкие значения кривизны и достаточно равномерные параметры высоты и диаметра свидетельствуют об устойчивом состоянии лесного массива. Небольшая часть деревьев с высокой кривизной или значительными отклонениями центра масс может быть менее устойчива к внешним факторам, что необходимо учитывать при планировании лесохозяйственных мероприятий.

Результаты исследования дают ценное представление о состоянии и характеристиках деревьев, что позволяет более точно подходить к планированию лесозаготовок и оценке состояния лесного фонда. В будущем можно провести более детальные исследования, направленные на оценку влияния внешних факторов, таких как климатические условия и почвенные особенности, на вариативность параметров деревьев.

Матрица корреляций между различными параметрами деревьев, такими как высота, диаметр у основания, диаметр у вершины, средняя кривизна, объем и площадь поверхности приведена на рис. 4. Данный подход аналогичен исследованию [Глухих, Черных, 2020], в котором также анализировались взаимосвязи между различными параметрами деревьев. Однако, в отличие от их работы, в нашем исследовании используются данные, полученные с помощью ИИ, что обеспечивает более точные и детализированные результаты.

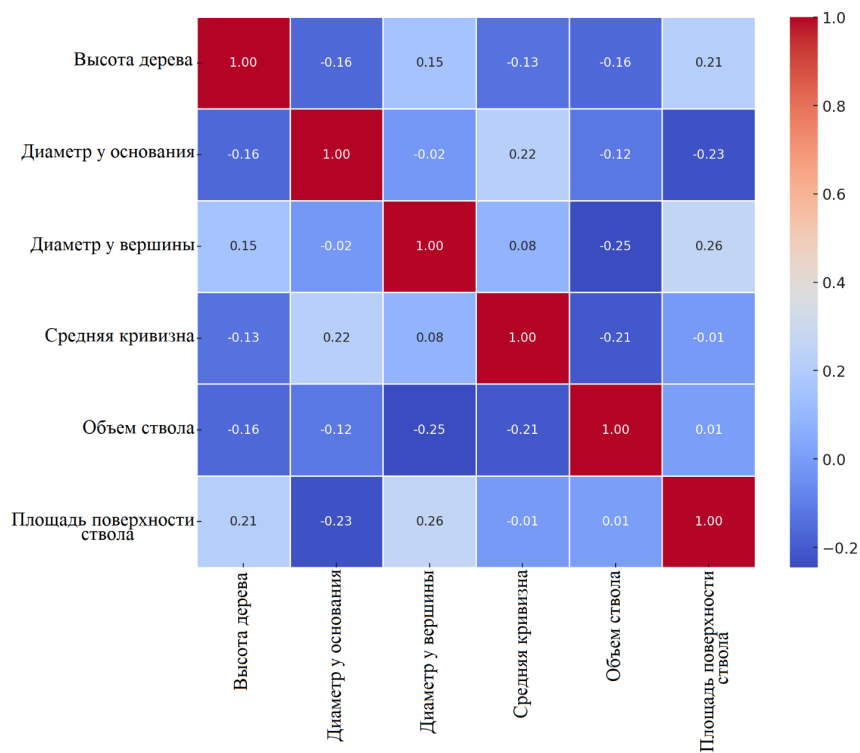


Рис. 4. Матрица корреляций

Fig. 4. Correlation matrix

Коэффициенты корреляции изменяются в диапазоне от -1 до 1 . Положительные значения означают прямую зависимость, в то время как отрицательные значения указывают на обратную зависимость.

Цветовая палитра помогает визуально определить силу корреляций: ярко-красные цвета показывают сильную положительную корреляцию, а синие — отрицательную.

Корреляции выше 0.7 можно считать сильными, а значения между 0.3 и 0.7 — умеренными. В этом случае высота дерева, диаметр у основания и объем имеют сильные взаимосвязи.

Высота дерева демонстрирует высокую положительную корреляцию с объемом ствола и площадью поверхности ствола. Это свидетельствует о том, что с увеличением высоты дерева происходит пропорциональное увеличение его объема и площади поверхности. Кроме того, высота дерева положительно коррелирует с диаметром у основания и диаметром у вершины, что подтверждает общепринятую биологическую закономерность: более высокие деревья, как правило, имеют больший диаметр ствола.

Диаметр у основания ствола также показывает высокую положительную корреляцию с объемом ствола и площадью поверхности. Это указывает на то, что диаметр у основания является ключевым параметром, определяющим общий объем и площадь поверхности дерева. Кроме того, наблюдается значимая положительная корреляция между диаметром у основания и высотой дерева, что подчеркивает взаимосвязь между этими параметрами.

Диаметр у вершины ствола демонстрирует положительную корреляцию с объемом и площадью поверхности, однако степень корреляции ниже, чем у диаметра у основания. Это может быть связано с тем, что диаметр у вершины более подвержен влиянию внешних факторов, таких как ветровые нагрузки, а также вариативности роста в зависимости от экологических условий.

Слабая отрицательная корреляция между кривизной ствола и высотой дерева, а также объемом, позволяет предположить, что более высокие и крупные деревья имеют меньшую кривизну. Это может быть связано с их адаптацией к условиям окружающей среды, где прямота ствола обеспечивает большую устойчивость. Средняя кривизна ствола не показывает значимой корреляции с остальными параметрами, что указывает на её зависимость от других факторов, таких как асимметричный рост или локальные условия среды.

Объем ствола и площадь поверхности дерева демонстрируют высокую положительную корреляцию между собой, что ожидаемо, поскольку оба

параметра связаны с общими размерами дерева. Кроме того, переменные сильно коррелируют с высотой дерева и диаметром у основания, что подтверждает их зависимость от основных морфометрических характеристик.

Корреляционный анализ позволяет сделать вывод, что высота, диаметр у основания, объем и площадь поверхности тесно связаны между собой и определяют общие размеры и массу дерева. Средняя кривизна имеет слабую корреляцию с другими параметрами, что свидетельствует о более случайном характере её изменений.

На рис. 5 представлены результаты сравнения высоты и диаметра у основания, измеренных с помощью облака точек и ручными замерами.

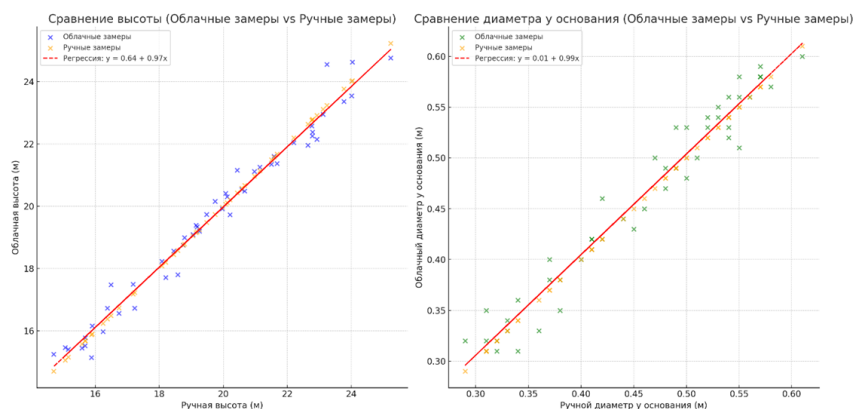


Рис. 5. Результаты сравнения высоты и диаметра у основания
Fig. 5. Results of comparison of height and diameter at the base

Линии регрессии на обоих графиках показывают, что результаты, полученные с помощью облака точек, близки к результатам ручных измерений, а значения наклона близки к 1. Точки располагаются вдоль линии идеального совпадения, что указывает на минимальные различия и высокую точность метода облака точек.

На рис. 6 представлены графики, отражающие зависимость ошибок между облачными и ручными измерениями для высоты и диаметра у основания дерева. Анализ графиков показывает, что в большинстве случаев ошибки между двумя методами измерений невелики и носят случайный характер. Подтверждается, что облачные измерения обладают высокой точностью, близкой к точности ручных замеров.

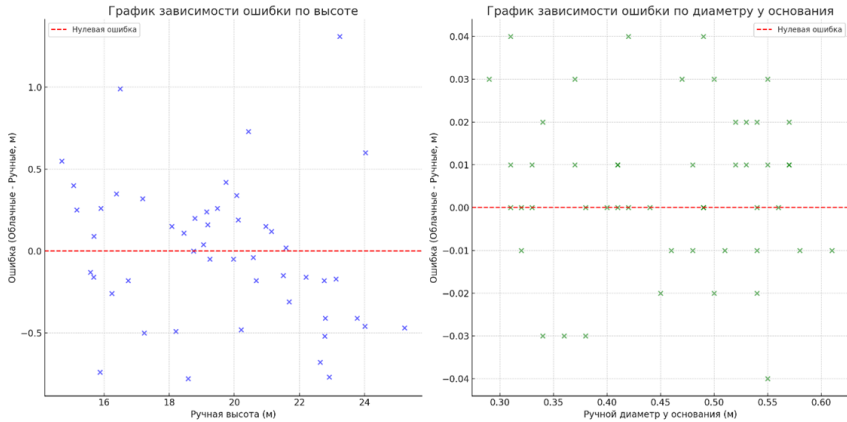


Рис. 6. Зависимость ошибок между облачными и ручными измерениями
Fig. 6. Dependence of errors between cloud and manual measurements

Стоит отметить, что для минимизации ошибок важно использовать высококачественное оборудование с высоким разрешением, проводить регулярную калибровку устройств, обеспечивать хорошие условия освещения и минимизировать влияние погодных условий, применять точные алгоритмы регистрации и построения 3D-моделей, многократно проверять результаты измерений и, по возможности, усреднять их для снижения случайных ошибок.

Заключение. Применение методов искусственного интеллекта для анализа физических характеристик деревьев и создания их трехмерных моделей открывает новые возможности для устойчивого управления лесными ресурсами. Разработанная методика позволяет существенно повысить точность и эффективность процесса оценки лесных массивов, что, в свою очередь, способствует минимизации негативного воздействия на лесные экосистемы и развитию более устойчивых методов лесозаготовки. Проведенный анализ 50 деревьев показал высокую точность и надежность используемых методов, а также позволил выявить важные особенности роста и структуры деревьев, которые могут быть использованы для оптимизации лесозаготовительных работ. Полученные данные могут служить основой для разработки рекомендаций по выбору стратегий заготовки древесины и обеспечения устойчивости лесных экосистем.

Средняя разница и стандартное отклонение показывают, что метод облака точек обеспечивает высокую точность, сравнимую с ручными замерами. На практике это подтверждает возможность использования облачных данных для точной оценки характеристик деревьев.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Войтов, Д.Ю., Васильев С.Б., Кормилицын Д.В. Разработка технологии определения породы деревьев с применением компьютерного зрения // Лесной вестник. 2023. Т. 27, № 1. С. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66.

Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С. Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194.

Говядин И.К. Инновационные подходы к сбору данных о высотах и диаметрах деревьев в насаждениях // Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Брянск, 2023. С. 179–182.

Говядин И.К., Каримов Б.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686447 Российская Федерация. Система учета и анализа : № 2023686474 : заявл. 05.12.2023 : опубл. 06.12.2023.

Говядин И.К., Каримов Б.М., Шерemet В.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612089 Российская Федерация. Система визуализации данных : № 2022668020 : заявл. 30.09.2022 : опубл. 30.01.2023.

Глухих В.Н., Черных А.Г. Обоснование овальности формы сечений стволов деревьев при их росте с наклоном // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 5. С. 166–175. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-166-175.

Дорофеева М.М., Бонечкая С.А. Сравнительный анализ некоторых классических и современных методик определения площади листовой поверхности // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56, № 2. С. 182–192. DOI: 10.31857/S0033994620020041.

Лебедев А.В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 3 (51). С. 56–70. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5.

Buchelt A., Adrowitzer A., Kieseberg P., Gollob C., Nothdurft A., Eresheim S., Tschatschek S., Stampfer K., Holzinger A. Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management // Forest Ecology and Management. 2024. Vol. 551. Art. no. 121530. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121530.

Gao Q., Kan J. Automatic Forest DBH Measurement Based on Structure from Motion Photogrammetry // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 9. Art. no. 2064. DOI: 10.3390/rs14092064.

Liang J., Gadow K. Applications of Artificial Intelligence in Forest Research and Management // Figshare. Journal Contribution. 2023. P. 42–45.

López-Serrano F.R., Rubio E., García Morote F.A., Manuela Andrés Abellán M., Picazo Córdoba M.I., García Saucedo F., Martínez García E., Sánchez García J.M., Serena Innerarity J., Lucas Carrasco L., García González O., García González J.C. Artificial intelligence-based software (AID-FOREST) for tree detection: A new framework for fast and accurate forest inventorying using LiDAR point clouds //

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 113. Art. no. 103014. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103014.

Mishra R., Mishra D., Agarwal R. Artificial intelligence and machine learning applications in forestry // Journal of Science Research International. 2024. Vol. 10. P. 43–55. DOI: 10.5281/zenodo.14028208.

Montaño R.A.N.R., Sanquetta C.R., Wojciechowski J., Mattar E., Corte A.P.D., Todt E. Artificial Intelligence Models to Estimate Biomass of Tropical Forest Trees // Polibits. 2017. Vol. 56. P. 29–37.

Raihan A. Artificial intelligence and machine learning applications in forest management and biodiversity conservation // Natural Resources Conservation and Research. 2023. Vol. 6, iss. 2. Art. no. 3825. DOI: 10.24294/nrcr.v6i2.3825.

Sheng W., Li R., Li H., Ma X., Ji Q., Xu F., Fu H. An Automated Method For Stem Diameter Measurement Based on Laser Module and Deep Learning // Plant methods. 2023. Vol. 19. Art. no. 68. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2107489/v1.

References

Buchelt A., Adrowitzer A., Kieseberg P., Gollob C., Nothdurft A., Eresheim S., Tschatschek S., Stampfer K., Holzinger A. Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management. *Forest Ecology and Management*, 2024, vol. 551, art. no. 121530. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121530.

Dorofeeva M.M., Bonetskaya S.A. Comparative analysis of some classical and modern methods for determining leaf surface area. *Plant Resources*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 182–192. DOI: 10.31857/S0033994620020041. (In Russ.)

Gao Q., Kan J. Automatic Forest DBH Measurement Based on Structure from Motion Photogrammetry. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, iss. 9, art. no. 2064. DOI: 10.3390/rs14092064.

Glukhikh V.N., Chernykh A.G. Reasoning of Tree Cross Sections Oval Shaping while Growing with an Inclination. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2020, no. 5, pp. 166–175. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-166-175. (In Russ.)

Govyadin I.K. Innovative approaches to collecting data on the heights and diameters of trees in plantations. *Prospects for the development of the forestry complex*: Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference. Bryansk, 2023, pp. 179–182. (In Russ.)

Govyadin I.K., Karimov B.M. Certificate of state registration of a computer program No. 2023686447 Russian Federation. Accounting and analysis system: No. 2023686474: application. 12.05.2023: publ. 12.06.2023. (In Russ.)

Govyadin I.K., Chubinsky A.N., Alekseev A.S. Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194. (In Russ.)

Govyadin I.K., Karimov B.M., Sheremet V.A. Certificate of state registration of a computer program No. 2023612089 Russian Federation. Data visualization system: No. 2022668020: appl. 09.30.2022: publ. 01.30.2023. (In Russ.)

Lebedev A.V. Inventory of tree plantations in urban areas using a smartphone. *Forestry Journal*, 2023, T. 13, no. 3 (51), pp. 56–70. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5. (In Russ.)

Liang J., Gadow K. Applications of Artificial Intelligence in Forest Research and Management. *Figshare. Journal Contribution*, 2023, pp. 42–45.

López-Serrano F.R., Rubio E., García Morote F.A., Manuela Andrés Abellán M., Picazo Córdoba M.I., García Saucedo F. Martínez García E., Sánchez García J.M., Serena Innerarity J., Lucas Carrasco L., García González O., García González J.C. Artificial intelligence-based software (AID-FOREST) for tree detection: A new framework for fast and accurate forest inventorying using LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, vol. 113, art. no. 103014. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103014.

Mishra R., Mishra D., Agarwal R. Artificial intelligence and machine learning applications in forestry. *Journal of Science Research International*, 2024, vol. 10, pp. 43–55. DOI: 10.5281/zenodo.14028208.

Montaño R.A.N.R., Sanquetta C.R., Wojciechowski J., Mattar E., Corte A.P.D., Todt E. Artificial Intelligence Models to Estimate Biomass of Tropical Forest Trees. *Polibits*, 2017, vol. 56, pp. 29–37.

Raihan A. Artificial intelligence and machine learning applications in forest management and biodiversity conservation. *Natural Resources Conservation and Research*, 2023, vol. 6, iss. 2, art. no. 3825. DOI: 10.24294/nrcr.v6i2.3825.

Sheng W., Li R., Li H., Ma X., Ji Q., Xu F., Fu H. An Automated Method For Stem Diameter Measurement Based on Laser Module and Deep Learning. *Plant methods*, 2023, vol. 19, art. no. 68. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2107489/v1.

Voitov D.Yu., Vasilyev S.B., Kormilitsyn D.V. Development of technology for determining tree species using computer vision. *Forestry Bulletin*, 2023, T. 27, no. 1, pp. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66.

Материал поступил в редакцию 26.01.2025

Говядин И.К., Чубинский А.Н. К вопросу о точности распознавания кривизны и высоты деревьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 253. С. 213–232. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.213-232

В статье рассматривается инновационный подход к оценке морфометрических параметров деревьев с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ) и компьютерного зрения. Основное внимание уделяется разработке методики точного измерения таких характеристик, как высота дерева, диаметры у основания и вершины, кривизна ствола, объем и

площадь поверхности. Авторы подчеркивают, что традиционные методы измерений, основанные на визуальном осмотре и ручных замерах, обладают существенными погрешностями и требуют значительных трудозатрат, в то время как автоматизированные системы на базе ИИ позволяют получать более точные и воспроизводимые результаты. Для сбора данных использовались аэрофотосъемка с дронов и наземная фотосъемка, что обеспечило комплексное покрытие стволов деревьев под разными углами. Полученные изображения обрабатывались с применением алгоритмов компьютерного зрения, включая сверточные нейронные сети (CNN), а также методов трехмерного моделирования на основе облаков точек. Это позволило создать детализированные цифровые модели деревьев, пригодные для точного анализа их геометрических параметров. Результаты исследования продемонстрировали высокую точность предложенного метода: сравнение с ручными замерами показало минимальные расхождения. Кроме того, авторы провели корреляционный анализ, выявивший взаимосвязи между различными параметрами деревьев, что имеет важное значение для оценки качества древесины и планирования лесозаготовок. Разработанная методика открывает новые возможности для устойчивого управления лесными ресурсами, позволяя минимизировать негативное воздействие на экосистемы и оптимизировать процессы лесопользования. Применение ИИ в лесном хозяйстве способствует переходу к более точным и экологически безопасным методам работы, что особенно актуально в условиях растущего спроса на древесину и необходимости сохранения биоразнообразия.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, машинное обучение, анализ деревьев, распознавание деревьев, алгоритмы ИИ.

Govyadin I.K., Chubinsky A.N. On the issue of accuracy of tree curvature and height recognition. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 253, pp. 213–232 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.213-232

The article discusses an innovative approach to assessing tree morphometric parameters using artificial intelligence (AI) and computer vision technologies. The main focus is on the development of a methodology for accurately measuring such characteristics as tree height, base and top diameters, trunk curvature, volume, and surface area. The authors emphasize that traditional measurement methods based on visual inspection and manual measurements have significant errors and require significant labor costs, while automated AI-based systems provide more accurate and reproducible results. Aerial photography from drones and ground photography were used to collect data, which provided comprehensive coverage of tree trunks from different angles. The resulting images were processed using computer vision algorithms, including convolutional neural networks (CNN), as well as 3D modeling methods based on point clouds. This made it possible to create detailed digital models of trees suitable

for accurate analysis of their geometric parameters. The results of the study demonstrated the high accuracy of the proposed method: comparison with manual measurements showed minimal discrepancies. In addition, the authors conducted a correlation analysis that revealed the relationships between various tree parameters, which is important for assessing the quality of wood and planning logging. The developed methodology opens up new opportunities for sustainable forest management, allowing to minimize the negative impact on ecosystems and optimize forest management processes. The use of AI in forestry contributes to the transition to more accurate and environmentally friendly working methods, which is especially important in the context of growing demand for wood and the need to preserve biodiversity.

Key words: artificial intelligence, computer vision, machine learning, tree analysis, tree recognition, AI algorithms.

ГОВЯДИН Илья Константинович – доцент кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: govvyadin812@gmail.com

GOVYADIN Ilya K. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Technology of Materials, Structures and Wood Constructions of the St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021. Institutskiy per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: govvyadin812@gmail.com

ЧУБИНСКИЙ Анатолий Николаевич – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

CHUBINSKY Anatoly N. – DSc (Technical), Professor of the Department of Technology of Materials, Structures and Wood Constructions of the St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021. Institutskiy per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com