

И.К. Говядин, А.Н. Чубинский, А.С. Алексеев

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ДЕРЕВЬЕВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Введение. В современном лесном хозяйстве, где стремление к устойчивому использованию ресурсов является одним из приоритетов, применение информационных технологий становится критически важным фактором. Одним из вызовов, стоящих перед специалистами в области лесного сектора экономики и исследователями, является точная оценка лесных ресурсов для эффективной заготовки и последующей переработки древесины.

Целью исследования является разработка метода распознавания стволов деревьев и измерения их диаметров с использованием современных информационных технологий. Наше внимание направлено на применение этого метода для более эффективной и точной оценки объема древесины с целью улучшения производственных процессов и уменьшения потерь в ходе последующей переработки. В дальнейшем расширение возможностей системы для оценки пород деревьев, их сбега, формы и кривизны стволов и других структурных особенностей позволит не только уточнить объем деловой древесины, доступной на лесосеке, но и повысить эффективность заготовки, предоставляя заготовителям детализированную информацию о качестве и количестве лесных ресурсов.

Кроме этого, повышение точности определения запасов древесины имеет значение для решения вопросов, связанных с ролью лесов в регулировании и компенсации возможных изменений климата, так как пулы и потоки углерода в лесных экосистемах определяются на основе их таксационных характеристик.

Для успешной реализации такого подхода крайне важно собрать обширный и разнообразный набор данных, который будет включать изображения и 3D-модели деревьев, снятые в различных условиях и локациях. Эти данные станут основой для тренировки и тестирования ИИ-моделей, обеспечивая их способность адаптироваться к реальным условиям работы на местности.

Ключевым моментом проекта является не только разработка алгоритма распознавания и анализа, но и создание интегрированной системы, спо-

собной обрабатывать полученные данные и предоставлять их в удобной форме для конечных пользователей. Это предполагает разработку пользовательского интерфейса и программной платформы, которые могут эффективно интегрировать различные источники информации, обеспечивая работникам лесного хозяйства и заготовителям доступ к актуальным и точным данным о лесных ресурсах.

В последние десятилетия, благодаря расширению применения искусственного интеллекта, в области распознавания и измерения физических объектов произошли революционные изменения в методах и подходах. Разработаны разнообразные подходы для автоматизации процессов оценки размеров и характеристик этих объектов, которые обеспечивают повышение точности и эффективности измерений [Войтов, 2023; Жук, Угрюмов, 2023; Портнов и др., 2022; Song et al., 2021; Grondin et al., 2022; Putra et al., 2021].

Среди методов распознавания стволов деревьев и измерения их диаметров технологии компьютерного зрения и машинного обучения играют ключевую роль. Эти методы включают в себя: обработку изображений и анализ текстур; выделение контуров; стереовидение и 3D-моделирование; глубокое обучение и нейронные сети и т. д.

Алгоритмы компьютерного зрения анализируют характеристики изображений, такие как контраст, цвет и текстура, для выделения деревьев на их природном фоне и определения их геометрических параметров. Это включает расчеты, основанные на перспективных искажениях и других визуальных маркерах, что позволяет точно измерять диаметр стволов деревьев даже в сложных лесных условиях [Селянкин, 2021].

Существующие методы измерений диаметра деревьев действительно продемонстрировали в последние годы значительные успехи [Лебедев, 2023; Sandim et al., 2023; Ficko, 2020], которые основаны на применении технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Однако важно понимать, что каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного метода обычно зависит от ряда факторов, включая специфические требования задачи, доступные ресурсы и условия окружающей среды. Например, методы, основанные на лазерных радарных данных, могут предложить высокую точность в трехмерном измерении стволов, но их применение может быть ограничено из-за высокой стоимости оборудования и обработки данных. С другой стороны, методы, основанные на обработке изображений, могут быть более доступными и гибкими, но их точность может варьироваться в зависимости от условий освещения и числа стволов в кадре съемки.

В свете этих соображений, нашей целью является разработка собственной системы распознавания стволов деревьев и измерения их диаметров, которая будет оптимизирована под конкретные природные условия и требования к точности измерений. Эта система будет включать в себя специализированную базу данных, содержащую информацию о местных видовых особенностях деревьев, их геометрии и фактуре коры, что позволит повысить точность идентификации и измерений. Благодаря обучению на собственных данных, система сможет учитывать региональные различия в высоте и форме деревьев, что является ключевым фактором для эффективного и точного измерения их диаметра [Говядин, Каримов, 2023; Говядин и др., 2023].

Разработка такой системы откроет перед работниками лесного хозяйства и лесозаготовителями новые возможности для повышения эффективности работы, позволяя им не только точно оценивать объем заготавливаемой древесины, но и оптимизировать процессы заготовки и переработки. Система будет способствовать более устойчивому управлению лесными ресурсами, обеспечивая высокую точность данных для экологического планирования, оценки запасов и мониторинга состояния лесов. В конечном счете, наша система станет инструментом, позволяющим работникам лесного хозяйства и лесозаготовителям не только повысить производительность и экономическую эффективность, но и внести вклад в сохранение лесных экосистем за счет более осознанного и ответственного подхода к использованию лесных ресурсов.

Материалы и методика исследования. Чтобы оценить эффективность нашего метода, сравнивали результаты, полученные с помощью комплекса технических средств, с результатами, полученными с помощью традиционных методов инвентаризации лесов.

Диаметр ствола дерева измерялся на высоте 1,3 метра от комля, что соответствует уровню груди человека среднего роста. Используя этот показатель диаметра, было создано множество таксационных таблиц, которые включают видовые числа, объемы стволов, динамику роста, а также сортиментные и товарные характеристики.

Для измерения диаметра ствола на высоте груди применяют разные инструменты и методы. В нашем случае определяли длину окружности дерева с помощью измерительной ленты (рис. 1). Вначале измерялась длина окружности ствола (обхват). Диаметр ствола находился делением измеренной длины окружности на постоянное число π .



Рис. 1. Ручные измерения в парке СПбГЛТУ
Fig. 1. Manual measurements in the SPbSFTU park

Оценка проводилась на территории парка Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. Сбор данных проводился в период с декабря 2023 года по конец января 2024 года.

Каждый участок был тщательно разбит на зоны, учитывая густоту деревьев, их размеры и распределение по территории. Затем, в пределах каждой зоны, были выбраны участки с наиболее схожими диаметрами стволов деревьев. Это позволило получить репрезентативные данные о диаметрах стволов на каждом участке, учитывая разнообразие деревьев и их характеристики на изучаемой территории.

Выбор участков с наиболее близкими диаметрами стволов позволил снизить влияние переменных, таких как возраст и порода деревьев, и обеспечить более точные и сопоставимые результаты измерений. Этот подход к сегментации участков обеспечил надежную основу для дальнейшего анализа и интерпретации полученных данных.

Данные с мест, где проводились измерения, и отчеты были организованы в таблицы Excel по участкам. Затем информация была перенесена в статистическое программное обеспечение. При обработке данных также учитывалась плотность древостоя.

Результаты исследования. Полученные данные свидетельствуют о том, что оптимальными условиями для проведения измерений с использо-

ванием специализированных технических устройств являются зрелые лесные массивы с низкой степенью плотности древостоев, характеризующиеся специфической пространственной структурой (то есть, равномерным расположением деревьев на территории), находящиеся в равнинных условиях рельефа местности и отличающиеся отсутствием плотного подлеска. Факторы, такие как плотность древостоя и присутствие обильного подроста и подлеска, в настоящее время оказывают значительное влияние на точность измерений, поскольку для корректного функционирования алгоритмов необходимы четкие визуальные образы, позволяющие дифференцировать стволы деревьев без их взаимного перекрытия, что является предпосылкой для точного распознавания и измерения.

В рамках проведенного анализа данных наблюдалось, что параметры яркости и контрастности, диктуемые уровнем освещенности, оказывают значимое воздействие на разнообразные компоненты исследуемой зоны, а также выступают в роли ограничивающих факторов для достижения оптимальной точности. Было выявлено, что колебания цветового спектра могут существенно влиять на точность распознавания объектов в полученных визуальных данных.

В ответ на требование повышенной точности идентификации деревьев на фотографиях был разработан алгоритм, специализирующийся на создании изображений с предварительно заданными уровнями контрастности. Данный алгоритм целенаправленно ориентирован на оптимизацию процесса идентификации деревьев, способствуя повышению общей точности аналитических операций. Это особенно актуально в контексте использования искусственного интеллекта, для распознавания и измерения диаметра стволов деревьев на основе визуальных данных (рис. 2).

Наш алгоритм объединяет методики коррекции цветовой палитры и усиления контраста, специально оптимизированные для анализа фотографий с деревьями. В его основу заложены следующие процедуры:

- *Конвертация цветового пространства:* Первоначальные изображения трансформируются в выбранное цветовое пространство, что улучшает манипуляции с контрастом и освещенностью для повышения эффективности обработки.

- *Регулировка яркости и насыщенности:* Применение методов коррекции яркости и насыщенности повышает выразительность деревьев, делая их более отчетливыми на природном фоне.

- *Усиление контрастности:* Интеграция алгоритмов для увеличения контрастности подчеркивает границы и текстурные особенности деревьев, упрощая их идентификацию.



Рис. 2. Увеличенное изображение накладки стволов деревьев и обучение модели
Fig. 2. Enlarged image of tree trunks overlay and model training

- *Адаптивная обработка изображений*: Алгоритм адаптируется к содержанию изображения, сохраняя природную эстетику сцен и улучшая визуализацию деревьев в разнообразных условиях, включая зимние сценарии.

Для дальнейшего усовершенствования распознавания деревьев алгоритм включает дополнительные функции:

- *сегментацию фона с использованием технологии ROI (Region of Interest)*. Алгоритм эффективно выделяет деревья, применяя сегментацию фона с акцентом на интересующие области (ROI), что существенно уменьшает влияние окружающей среды на процесс идентификации.

- *автоматическую настройку яркости и контрастности*. Параметры яркости и контрастности корректируются автоматически в соответствии с уровнем освещения и особенностями изображения, гарантируя стабильные и верные результаты.

Эти усовершенствования, совместно с механизмами коррекции контрастности, делают подход к идентификации деревьев на изображениях эффективным и точным по сравнению с традиционными методами.

Результаты исследований (табл. 1) показывают, что применение данной технологии демонстрирует ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами инвентаризации.

Применение методологий компьютерного зрения в задачах аналитики и оценки состояния лесных экосистем демонстрирует значительные преимущества перед традиционными подходами в плане объема обрабатываемых данных и глубины их анализа. Данная технология, интегрируя алгоритмы искусственного интеллекта, способствует комплексному изучению состояния лесных массивов, обеспечивая обработку и интерпретацию многомерных датасетов, состоящих из разнородных источников информации. Такой подход значительно увеличивает репрезентативность выборки и обеспечивает высокую степень объективности оценок за счет анализа объемов данных, недоступных для традиционной экспертной оценки.

Таблица 1

Сравнение измерений диаметра стволов деревьев ручным способом (РС) и искусственным интеллектом (ИИ)

Comparison of tree trunk diameter measurements manually (MS) and artificial intelligence (AI)

ИД дерева	Диаметр, (ИИ), см	Диаметр (РС), см	Разница в измерениях, см	Эффективность
1	45,2	45,5	–0,3	0,993
2	30,1	30,0	0,1	0,997
3	50,5	51,0	–0,5	0,990
4	40,0	39,8	0,2	0,995
5	35,3	35,5	–0,2	0,994
6	53,3	53,6	–0,3	0,994
7	35,7	36,0	–0,3	0,992
...	...	...	...	...
28	45,3	45,6	–0,3	0,993
29	46,1	46,4	–0,3	0,994
30	35,2	35,5	–0,3	0,992
Средняя эффективность измерений диаметра деревьев:				0,9841 (или 98,41%)

Кроме того, автоматизация процессов сбора, обработки и анализа информации минимизирует человеческое участие, снижая тем самым вероятность субъективных ошибок и повышая эффективность исследовательских процедур. В контексте сохранения и управления лесными ресурсами применение данного метода открывает новые перспективы для проведения научно обоснованной оценки состояния лесных экосистем, их мониторинга и прогнозирования изменений, обусловленных антропогенным воздействием и климатическими факторами.

Измеренные ручным способом диаметры деревьев принимались за их истинные значения. Для оценки качества определения диаметров деревьев на основе данного этапа обучения ИИ вычислялись систематическая и случайная ошибки измерений:

- Систематическая ошибка (смещение) представляет собой среднюю разницу между измерениями, сделанными двумя способами. При наличии она указывает знак и величину постоянной ошибки, которую вносит предлагаемый метод измерения.
- Случайная ошибка оценивается как стандартное отклонение разностей между измерениями, сделанными методом ИИ и ручным способом.

В нашем случае систематическая ошибка измерений диаметра стволов деревьев составляет -0,58 см, что указывает на занижение диаметров деревьев, измеренных с помощью искусственного интеллекта. Случайная ошибка составляет 0,83 см, отражая изменчивость и непредсказуемость ошибок при измерениях методом ИИ.

Систематические и случайные ошибки не должны превосходить нормативов, установленных лесоустроительной инструкцией*. Средние диаметры совокупности измеренных деревьев составляют 42,4 и 43,0 см при измерениях методом ИИ и ручным способом, соответственно. Систематическая ошибка в этом случае равна 1,4 % при допустимой величине для самого точного глазомерно-измерительного метода таксации 5%, случайная – 2% при допустимой величине 10%.

Таким образом, можно сделать вывод, что метод измерения диаметров деревьев, основанный на применении технологий искусственного интеллекта, удовлетворяет требованиям по точности измерений согласно действующим нормативно-правовым документам.

Из выражения (1) видно, что эффективность в данном контексте была рассчитана как отношение меньшего из двух измерений диаметра дерева

* Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 5.08.2022 № 510 «Об утверждении лесоустроительной инструкции».

(ИИ или ручное измерение) к большему из этих двух значений. Этот расчёт позволяет оценить, насколько близки друг к другу результаты измерений, выполненных разными методами. Формула для расчёта эффективности выглядит следующим образом:

$$\text{Эффективность} = \frac{\min(\text{Диаметр (ИИ)}, \text{Диаметр (ручное измерение)})}{\max(\text{Диаметр (ИИ)}, \text{Диаметр (ручное измерение)})}. \quad (1)$$

Эффективность выражается в долях единицы (или в процентах, если умножить на 100). Значение 1 (или 100%) указывает на идеальное совпадение измерений, выполненных с помощью ИИ и ручным методом, что означает максимальную эффективность измерительных методов. Чем ближе значение эффективности к 1, тем меньше разница между двумя методами измерения, и наоборот, чем значение меньше, тем больше разница между измерениями.

Анализ данных показал, что в большинстве случаев разница между измерениями, выполненными с помощью ИИ и традиционным ручным способом, не превышает критически значимых порогов, что свидетельствует о высокой точности и надёжности алгоритмов ИИ для выполнения данного типа задач. Показатель эффективности в большинстве случаев близок к единице, что демонстрирует высокую степень согласованности между методами измерения.

Для статистического анализа данных по измерению диаметра деревьев с использованием искусственного интеллекта и ручными методами рассмотрим следующие статистические показатели (табл. 2):

Таблица 2

Результаты статистического анализа данных

Results of statistical data analysis

№ п/п	Наименование	Искусственный интеллект	Ручное измерение
1	Среднее значение	42,43	43,01
2	Стандартное отклонение	9,06	8,79
3	Минимальное значение	28,1	30,0
4	Максимальное значение	58,7	59,0
5	25% квартиль	35,23	35,5
6	75% квартиль	48,28	49,48
7	Коэффициент вариации	21,35%	20,43%

1. Среднее значение – показывает средний размер диаметра деревьев, измеренный каждым методом.

2. Стандартное отклонение – отражает степень разброса измерений относительно среднего значения.

3. Минимальное и максимальное значения – позволяют оценить диапазон измеренных диаметров.

4. Квартили (25-й и 75-й) – информируют о распределении значений диаметра внутри выборки, позволяя увидеть, где сосредоточена основная масса измерений.

5. Коэффициент вариации – это отношение стандартного отклонения к среднему значению, выраженное в процентах, показывает относительный разброс данных вокруг среднего значения и используется для сравнения степени вариабельности между различными наборами данных.

Центральная тенденция: средние значения диаметра деревьев, измеренные с помощью ИИ и ручными методами, близки друг к другу, что указывает на согласованность результатов обоих методов.

Разброс данных: стандартные отклонения для обоих методов также схожи, что свидетельствует о сопоставимом уровне вариабельности измерений в обеих группах.

Коэффициент вариации показывает, что относительный разброс данных вокруг среднего значения сопоставим между методами измерения, с незначительно более высоким значением для измерений, выполненных с помощью ИИ. Это может указывать на чуть большую вариативность в измерениях ИИ по сравнению с ручными измерениями.

В целом результаты статистического анализа подтверждают высокую степень согласованности и сопоставимости между измерениями диаметра деревьев, выполненными с помощью искусственного интеллекта и традиционными ручными методами. Это демонстрирует потенциал интеграции алгоритмов ИИ в процессы сбора и анализа данных для повышения эффективности и точности измерений.

Анализ корреляции проводился для определения степени зависимости между двумя переменными. В нашем случае исследуем корреляцию между результатами измерений диаметра деревьев, выполненных с помощью искусственного интеллекта и ручными методами. Для этого используем коэффициент корреляции Пирсона.

Корреляция считается значимой на уровне 0,05 (5%) или 0,01 (1%), если р-значение (вероятность ошибки первого рода) соответствующего статистического теста меньше этих порогов.

Коэффициент корреляции Пирсона между результатами измерений диаметра деревьев, выполненных с использованием искусственного интеллекта, и ручными методами, составляет 0,996. Это указывает на очень вы-

сокую положительную линейную корреляцию между измерениями диаметра деревьев, выполненными с помощью ИИ и ручными методами. Такой высокий коэффициент корреляции говорит о том, что с увеличением значений одной переменной соответственно увеличиваются и значения другой переменной, что подтверждает согласованность и взаимозаменяемость обоих методов измерения в данном исследовании.

Сравнительный анализ средних значений диаметра деревьев, измеренных с помощью искусственного интеллекта и ручными методами, был выполнен с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок.

Значение t-критерия Стьюдента, равное $-0,253$, указывает на незначительную разницу между средними значениями диаметра, измеренными различными методами. Отрицательное значение этой статистики свидетельствует о том, что среднее значение, полученное с помощью ИИ, незначительно ниже по сравнению с результатами ручных измерений.

Значение вероятности p , равное $0,801$, превышает общепринятый порог статистической значимости ($0,05$ или 5%), что демонстрирует отсутствие статистически значимых различий между сравниваемыми группами данных.

В рамках исследования представлены два графика для анализа данных измерений диаметра деревьев, выполненных с использованием искусственного интеллекта и ручными методами.

График распределения измерений диаметра деревьев (рис. 3) показывает, что оба метода измерения имеют схожие распределения с небольшими различиями в плотности распределения. Это указывает на то, что оба метода предоставляют сопоставимые результаты с некоторым перекрытием в измеренных значениях диаметра деревьев.

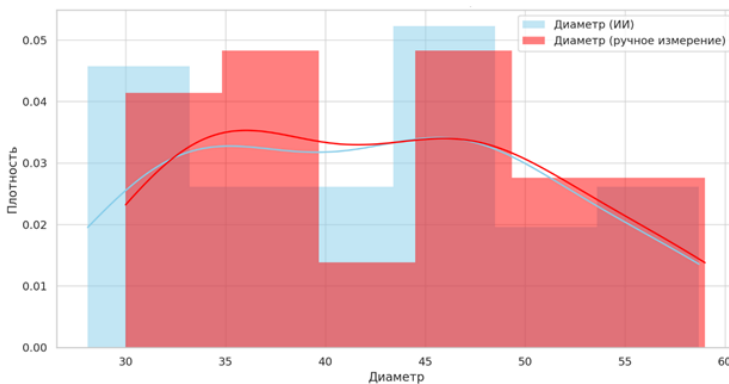


Рис. 3. График плотности распределения измерений диаметра деревьев

Fig. 3. Density distribution plot of tree diameter measurements

График корреляции между ИИ и ручными измерениями диаметра деревьев (рис. 4) демонстрирует сильную линейную зависимость между результатами, полученными двумя методами. Большинство точек данных тесно сгруппированы вокруг диагонали, что подтверждает высокий уровень корреляции, ранее рассчитанный как 0,996.

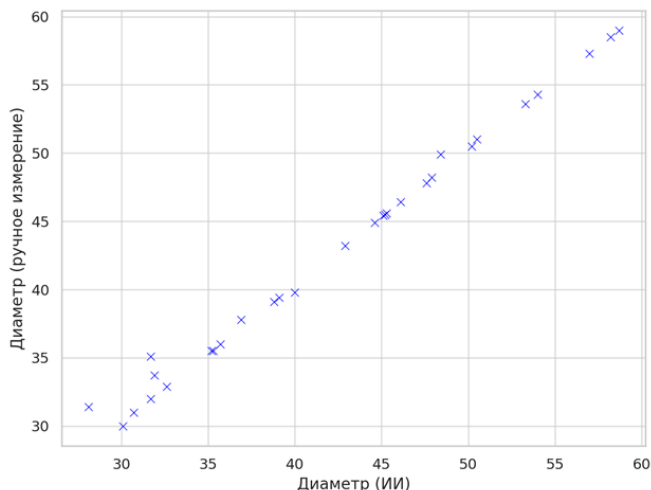


Рис. 4. График корреляции между ИИ и ручными измерениями

Fig. 4. Correlation plot between AI and manual measurements

Задача, связанная с сегментацией взаимно перекрывающихся объектов на изображениях, в данном контексте – деревьев, представляет собой значимый вызов для технологии ИИ, для решения которого были разработаны многочисленные методологии:

расширенное обнаружение и сегментация, мультиперспективный анализ, применение методов обработки изображений и предварительной фильтрации, интерактивные методы коррекции, интеграция дополнительных данных, обучение с учителем, усиленное глубокое обучение, оптимизация параметров модели.

Закключение. В ходе исследования было проведено сравнение методик измерения диаметров стволов деревьев с использованием технологий искусственного интеллекта с традиционными ручными методами измерения. Полученные данные демонстрируют, что результаты, полученные с помощью искусственного интеллекта, во многом приближены к значениям, за-

фиксированным в ходе ручных измерений, что подтверждает высокий потенциал применения данной технологии в лесном хозяйстве.

Однако, несмотря на значительные достижения в области автоматизации измерений, были выявлены определенные трудности, в частности, проблема распознавания отдельных деревьев при их плотном, одноосном расположении относительно друг друга. В таких случаях система может воспринимать несколько стволов как единый объект, что затрудняет точное измерение диаметра ствола дерева.

Для преодоления этого барьера предлагается в дальнейшем использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для сбора визуальных данных. Преимущество данного подхода заключается в возможности получения видеоматериалов и фотографий с различных ракурсов, что позволяет более детально рассмотреть каждое дерево и определить его параметры с высокой степенью точности. Использование БПЛА не только упростит процесс идентификации и измерения диаметров стволов в условиях их плотной посадки, но и значительно повысит эффективность исследований лесных массивов в целом [Говядин, 2023].

Таким образом, сочетание современных технологий и возможностей БПЛА открывает новые перспективы для автоматизации и усовершенствования методик измерения и анализа лесных ресурсов, способствуя повышению точности и объективности получаемых данных.

Для повышения точности и надёжности измерений рекомендуется развитие и оптимизация алгоритмов ИИ, а также проведение дополнительных исследований с увеличенным объёмом данных. Это поможет улучшить адаптацию технологий ИИ к специфическим условиям различных типов лесных экосистем.

Исследование выполнено в контексте участия ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» во Всероссийском инновационном проекте государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

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. EDN: PXEBDF.

Говядин И.К. Инновационные подходы к сбору данных о высотах и диаметрах деревьев в насаждениях // Перспективы развития лесного комплекса : сб. науч. трудов Междунар. науч.-практич. конференции, Брянск, 18–19 декабря 2023 года. С. 179–182. EDN: JWJABM.

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; заяв. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова». EDN FJVAWI.

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

Жук К.Д., Угрюмов С.А. Выбор оптимального алгоритма машинного обучения для задачи классификации породы ствола дерева // Цифровые технологии в лесном секторе: матер. IV Всерос. науч.-технич. конференции, Санкт-Петербург, 19–20 октября 2023 года. С. 32–34. EDN: WAQLFH.

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

Портнов А.М., Иванова Н.В., Шашков М.П. Опыт использования нейронной сети DeepForest для детектирования деревьев в широколиственном лесу // Математическая биология и биоинформатика: докл. IX Междунар. конференции, Пушкино, 17–19 октября 2022 года. Т. 9. С. 211–216. DOI: 10.17537/icmbb22.12. EDN: ODUVAY.

Селянкин В.В. Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 152 с.

Ficko A. Bayesian Evaluation of Smartphone Applications for Forest Inventories in Small Forest Holdings // Forests. 2020. 11. P. 1148. DOI: 10.3390/f11111148.

Grondin V., Fortin J.-M., Pomerleau F., Giguère Ph. Tree Detection and Diameter Estimation Based on Deep Learning. 2022. DOI: 10.1093/forestry/cpac043.

Putra B., Indarto I., Marhaenanto B., Janna N. Yualianto, Soedibyo D. The use of computer vision to estimate tree diameter and circumference in homogeneous and production forests using a non-contact method // Forest Science and Technology. 2021. 17. 10.1080/21580103.2021.1873866.

Sandim A., Amaro M., Silva M., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Louzada J., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications // Forests. 2023. 14. DOI: 10.3390/f14081553.

Song C., Yang B., Zhang L. et al. A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition. Plant Methods. 2021. 17, 67. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.

Tatsumi Sh., Yamaguchi K., Furuya N. Forest Scanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. 14. 10.1111/2041-210x.13900.

References

Ficko A. Bayesian Evaluation of Smartphone Applications for Forest Inventories in Small Forest Holdings. *Forests*, 2020, 11, p. 1148. DOI: 10.3390/f11111148.

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, December 18–19, 2023, pp. 179–182. EDN JWJABM. (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; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University». EDN FJVAWI. (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: application. 09/30/2022: publ. 01/30/2023. EDN QVAQKV. (In Russ.)

Grondin V., Fortin J.-M., Pomerleau F., Giguère Ph. Tree Detection and Diameter Estimation Based on Deep Learning. 2022. DOI: 10.1093/forestry/cpac043.

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

Portnov A.M., Ivanova N.V., Shashkov M.P. Experience of using the DeepForest neural network for detecting trees in a broad-leaved forest, *Mathematical biology and bioinformatics: Reports of the IX International Conference*, Pushchino, October 17–19, 2022, vol. 9, pp. 211–216. DOI: 10.17537/icmbb22.12. EDN: ODUVAY. (In Russ.)

Putra B., Indarto I., Marhaenanto B., Janna N. Yualianto, Soedibyo D. The use of computer vision to estimate tree diameter and circumference in homogeneous and production forests using a non-contact method. *Forest Science and Technology*, 2021, 17. 10.1080/21580103.2021.1873866.

Sandim A., Amaro M., Silva M., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Louzada J., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests*, 2023, 14. DOI: 10.3390/f14081553.

Selyankin V.V. Computer vision. Image analysis and processing: textbook for universities. 2nd ed., revised. St. Petersburg: Lan, 2021. 152 p. (In Russ.)

Song C., Yang B., Zhang L. et al. A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition. *Plant Methods*, 2021, 17, 67. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.

Tatsumi Sh., Yamaguchi K., Furuya N. Forest Scanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 14. 10.1111/2041-210x.13900.

Voitov D.Yu., Vasilyev S.B., Kormilitsyn D.V. Development of technology for determining tree species using computer vision. *Forest Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66. EDN: PXEBDF. (In Russ.)

Zhuk K.D., Ugryumov S.A. Selection of the optimal machine learning algorithm for the task of classifying tree trunk species. *Digital technologies in the forest sector: materials of the IV All-Russian scientific and technical conference*, St. Petersburg, October 19–20, 2023, pp. 32–34. EDN WAQLFH. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.04.2024

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

В современном лесном хозяйстве, акцентирующем внимание на устойчивом использовании ресурсов, ключевым становится внедрение информационных технологий, обеспечивающих точную оценку лесных ресурсов для обеспечения эффективного управления, заготовки и переработки. Исследование фокусируется на разработке метода распознавания стволов деревьев с применением современных технологических решений. Применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) значительно трансформировало подходы к измерению и анализу физических объектов, предлагая методы автоматизации оценки размеров и характеристик деревьев с повышенной точностью и эффективностью. Исследование подчеркивает, что оптимальные условия для проведения замеров с использованием специализированных технических средств предполагают низкую плотность древостоя и отсутствие обильного подроста и подлеска. Анализ показывает, что интеграция алгоритмов ИИ в процессы сбора и анализа данных обеспечивает высокую точность и надежность измерений, сравнимую с традиционными ручными методами, демонстрируя таким образом свой потенциал практического применения. В работе обозначена проблема идентификации отдельных деревьев при их плотном расположении, когда система может ошибочно воспринимать несколько стволов как единый объект, что мешает точному измерению диаметров. Для дальнейшего улучшения точности и надежности измерений рекомендуется использование беспилотных летательных аппаратов для сбора визуальных данных с разных ракурсов, развитие и оптимизация алгоритмов ИИ, а также проведение исследований на расширенном объеме данных, что поможет адаптировать технологии ИИ к разнообразным условиям лесных экосистем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, измерение диаметра деревьев, распознавание деревьев, алгоритмы ИИ.

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

In modern forestry, which emphasizes the sustainable use of resources, the key is the introduction of information technologies that provide accurate assessment of forest resources to ensure effective management, harvesting and processing. The research focuses on developing a tree trunk recognition method using modern technological solutions. The application of artificial intelligence (AI) technologies has significantly transformed approaches to measuring and analyzing physical objects, offering methods to automate the estimation of tree size and characteristics with increased accuracy and efficiency. The study emphasizes that optimal conditions for carrying out measurements using specialized technical means involve low tree density and the absence of abundant undergrowth and shrubs. The analysis shows that the integration of AI algorithms into data collection and analysis processes provides high measurement accuracy and reliability comparable to traditional manual methods, thus demonstrating its potential for practical application. The work identifies the problem of identifying individual trees when they are densely located, when the system may mistakenly perceive several trunks as a single object, which interferes with the accurate measurement of diameters. To further improve the accuracy and reliability of measurements, it is recommended to use unmanned aerial vehicles to collect visual data from different angles, develop and optimize AI algorithms, and conduct research on an expanded volume of data, which will help adapt AI technologies to the diverse conditions of forest ecosystems.

Keywords: artificial intelligence, computer vision, tree diameter measurement, 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: govyadin812@gmail.com

GOVYADIN Ilya K. – PhD (Technical), St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: govyadin812@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 St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

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

АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, профессор. SPIN-код: 8115-9103. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

ALEKSEEV Aleksandr S. – DSc (Geography), professor, head of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-код: 8115-9103. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a_s_alekseev@mail.ru