

На правах рукописи



Рогачев Дмитрий Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-СУЧКОРЕЗНО-
РАСКРЯЖЕВОЧНОЙ МАШИНЫ**

Специальность 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного
хозяйства и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Мытищинском филиале Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Быковский Максим Анатольевич**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Галактионов Олег Николаевич**,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Технологии лесного комплекса и ландшафтной архитектуры Института лесных, горных и строительных наук ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Танрывердиев Илья Оруджевич
кандидат технических наук, доцент кафедры Проектирования и производства электронно-вычислительных средств Радиотехнического факультета ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Защита диссертации состоится «16» мая 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.10 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: Российская Федерация, 141005, г. Мытищи, улица 1-я Институтская, 1, ауд. 1222.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» <https://mf.bmstu.ru/info/dissovet/announcement/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета, к.т.н., доцент

Голубев Михаил Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Утверждённая «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» является ключевым нормативно-правовым актом, определяющим векторы развития лесопользования и лесной промышленности в России. Принятие стратегии имеет особое значение для сохранения и рационального использования лесных ресурсов, а также для перехода от экстенсивных к интенсивным методам землепользования.

Интенсивные методы лесозаготовок направлены на повышение производительности труда и экологической устойчивости лесного комплекса путём применения инновационных технологий, оптимизации технологических процессов заготовки, восстановления и управления лесами. Данный подход способствует эффективному лесопользованию и сохранению экологического баланса.

Развитие технологий как с точки зрения технологического потенциала, так и с точки зрения экономически эффективной интеграции происходит экспоненциальными темпами. В то время как высокотехнологичные роботизированные системы уже стали обычным явлением в таких отраслях, как сельское хозяйство, горнодобывающая промышленность, в лесной отрасли они пока не получили широкого распространения

Экстраполируя цифровое развитие смежных отраслей на лесозаготовительные машины, можно сделать обоснованное предположение о том, что на пути создания полностью автономной лесозаготовительной машины должны быть промежуточные этапы с решениями, автоматизирующими рутинные операции. Одним из таких решений должна стать система поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины.

Степень разработанности темы. В рамках диссертационного исследования проведён комплексный анализ существующих исследований из взаимосвязанных областей, таких как: оптимизация рабочего процесса оператора валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины, внедрение цифровых технологий в лесохозяйственный комплекс, применение элементов машинного зрения для определения таксационных параметров деревьев, обработка данных с облака точек и формирование набора данных для обучения нейронных сетей.

Приняты во внимание работы авторов: Анучин Н.П., Бухтояров Л.Д., Быковский М.А., Васенёв М.Ю., Васильев С.Б., Галактионов О.Н., Гусев Н.Н., Данилин И.М., Демидов Д.Н., Думов М.И., Жук К.Д., Загреев В.В., Захаров В.К., Кабонен А.В., Каплина Н.Ф., Карпачев С.П., Комиссаров А.В., Котов А.А., Клубничкин В.Е., Кравченко П.П., Ласточкин Д.М., Лебков В.Ф., Макаров В.С., Мошкалев А.Г., Петухов И.В., Севрюгина Н.С., Середович В.А., Танрывердиев И.О., Alvites C., Broughton R.K., Chernov N.I., Feng Y., Gril E., He Z., Kasa I., Kelly M., La Hera P. M., Lindroos O., Lopatin E., Mehendale N., Montagni A., Ososkov G.A., Pratt V., Puliti S., Taubin G., Turner P. и др.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение технологической эффективности работы оператора валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины за счёт разработки системы поддержки принятия решений, основанной на дистанционном определении таксационных параметров дерева.

Для достижения цели исследования сформулированы следующие научные задачи:

- Анализ оптимального размещения лазерного сканера LiDAR (Light Detection and Ranging) на валочно-сучкорезно-раскряжёвочной машине с учётом специфики её конструкции и выполняемых операций, а также обоснование технических характеристик сканера.

- Разработка алгоритма фильтрации шумов для облака точек, полученного при наземном лазерном сканировании участка леса с помощью лазерного сканера LiDAR и цифровой камеры, на основе цвета точек.

- Исследование и сравнительный анализ методик определения диаметра поперечного сечения ствола дерева с учётом его наклона на основе данных наземного лазерного сканирования.

- Разработка методики генерации библиотеки синтетических данных LiDAR, предназначенной для обучения нейронной сети для реализации сегментации стволов деревьев из облака точек, полученного посредством наземного лазерного сканирования участка леса.

- Разработка математической модели для визуализации мест, из которых возможно производить валку дерева на основе данных, полученных с помощью лазерного сканера LiDAR при наземном сканировании участка леса.

- Теоретическая оценка влияния системы поддержки принятия решений на производительность оператора лесозаготовительной машины.

Объект исследования: процесс лесозаготовки с применением лесозаготовительной техники, оснащённой интеллектуальной системой машинного зрения.

Предмет исследования: алгоритмы и методики предобработки облаков точек, получаемых посредством наземного лазерного сканирования лесных массивов, с целью извлечения таксационных параметров деревьев.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель для аналитической оценки количества лучей лазерного сканера LiDAR, пересекающих ствол дерева, данная модель служит теоретической основой для обоснования возможности применения сканера LiDAR в целях автоматизации и информатизации управления лесозаготовительной машиной, отличающаяся учётом характеристик образующей древесного ствола и местоположения сканера на базовой машине.

2. Разработан алгоритм фильтрации шумов облака точек, полученного при наземном лазерном сканировании участка леса, с целью повышения точности работы неразрушающих методов оценки древесины, отличающийся применением последовательности фильтров, анализирующих цветовые пространства YCbCr и Lab, а также локальную кривизну точек.

3. Разработана методика создания библиотеки синтетических данных LiDAR, предназначенной для обучения нейронной сети, выполняющей сегментацию стволов деревьев в облаке точек, полученном посредством наземного лазерного сканирования участка леса, отличающаяся моделированием деревьев с учётом характеристик образующей древесного ствола.

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечиваются экспериментальными исследованиями и возможностью их воспроизведения при наличии аналогичного оборудования и соблюдении описанных условий эксперимента.

Методы исследований. В диссертационной работе использован комплексный подход, объединяющий компьютерное моделирование, обработку данных и экспериментальные исследования. Геометрическое и статистическое моделирование применялось для анализа зон сканирования LiDAR, создания синтетических данных. Алгоритмы фильтрации шумов, сегментации облаков точек и определения таксационных параметров деревьев с помощью методов обработки данных и машинного обучения. Эффективность разработанных решений оценивалась путём сравнительного анализа и оценки производительности.

Основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

1. Алгоритм фильтрации шумов облака точек, полученного посредством наземного лазерного сканирования участка леса, основанный на последовательном применении фильтров, анализирующих цветовые модели YCbCr и Lab и локальную кривизну точек.

2. Методика генерации библиотеки синтетических данных LiDAR, предназначенной для обучения нейронной сети, с целью сегментации стволов деревьев из облака точек.

3. Результаты теоретической оценки влияния системы поддержки принятия решений на производительность оператора лесозаготовительной машины.

Личный вклад диссертанта в решение поставленных задач. Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично. В частности, автором разработан алгоритм фильтрации шумов облака точек, анализирующий цветовые модели YCbCr и Lab и локальную кривизну точек, методика генерации библиотеки синтетических данных LiDAR на основе характеристик образующей древесного ствола и математическая модель карты местности, предназначенная для визуализации мест, из которых возможно производить валку деревьев.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

– Проведено исследование по оптимизации размещения лазерного сканера на лесозаготовительной машине с целью дистанционного получения таксационных параметров деревьев.

– Разработан алгоритм фильтрации облаков точек, полученных наземным лазерным сканированием с использованием LiDAR и цифровой камеры. Алгоритм основан на цветовых моделях YCbCr и Lab и предназначен для удаления точек, соответствующих листве.

– Предложен метод фильтрации облаков точек, основанный на анализе значения локальной кривизны. Данный метод, применяемый к данным наземного LiDAR-сканирования, позволяет сегментировать точки, принадлежащие ветвям деревьев, и исключить их из дальнейшей обработки.

– Исследованы методы определения диаметра поперечного сечения ствола дерева с учётом его пространственной ориентации на основе данных наземного лазерного сканирования.

– Предложена методика формирования синтетического набора данных для обучения нейронной сети, осуществляющей сегментацию стволов деревьев в облаках точек, полученных при наземном LiDAR-сканировании лесного участка.

– Создана математическая модель для визуализации зон, пригодных для валки деревьев, работа модели основана на результатах обработки облака точек, полученного при наземном сканировании лесного участка.

– Установлена положительная корреляция между использованием системы поддержки принятия решений и производительностью оператора лесозаготовительной машины.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют пунктам: «1 – Параметры и показатели предмета труда в лесном хозяйстве и лесной промышленности как объекта обработки (технологических воздействий); создание информационных баз»; «6 – Автоматизация, роботизация, информатизация управления машинами и системами лесного хозяйства и лесной промышленности»; «12 – Неразрушающие методы и квалитетрическая оценка древесины на корню, в сортиментах, в конструкциях из древесины и древесных материалов»; из паспорта специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в учебном процессе кафедр технологии и оборудование лесопромышленного производства и транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждается соответствующим актом. Реализованное программное обеспечение, полученное в результате работы над диссертацией, внедрено в предприятие ООО «ЛЕСТЕХ-ФИНАНС», что подтверждается соответствующим актом.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на научно-технических конференциях МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана Мытищи 2021-2024; на Всероссийской научно-практической конференции «Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития» Воронеж 2023; на VIII Всероссийской научной-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» Санкт-Петербург 2023; на XVIII Международном лесном форуме и выставке техники и оборудования для лесного комплекса «Российский лес 2023» Вологда 2023.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 3 в рецензируемых журналах, рекомендуемых перечнем ВАК РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих результатов и выводов, списка литературы и трех приложений. Работа изложена на 225 листах машинного текста, содержит 132 рисунка, 26 таблиц. Список литературы содержит 186 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, раскрыта научная новизна работы, её практическая и научная значимость. Содержатся сведения о структуре и объёме диссертации.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому обоснованию и анализу предметной области проводимого исследования. В ней детально рассмотрены основные этапы рабочего процесса оператора валочно-сучкорезно-раскряжёвочной машины (ВСРМ), что позволяет выявить потенциал для автоматизации и оптимизации его действий. Далее представлен анализ тенденций цифровизации в лесном комплексе, подчёркивающий актуальность внедрения передовых технологий в данную отрасль. В главе также рассмотрены основные элементы машинного зрения и методы дистанционного определения

таксационных параметров растущего дерева, которые составляют фундамент для разработки системы поддержки принятия решений. Особое внимание уделено анализу методов фильтрации облаков точек LiDAR и формированию библиотек данных для обучения нейронных сетей, что является необходимым этапом для реализации алгоритмов автоматизированной обработки данных.

Комплексный анализ литературы, представленный в первой главе, формирует теоретическую базу для последующих исследований и позволяет чётко сформулировать задачи диссертации, решению которых посвящены последующие главы.

Вторая глава диссертации посвящена разработке концепции системы поддержки принятия решений оператора валочно-сучкорезно-раскряжёвочной машины и методическому обоснованию её реализации.

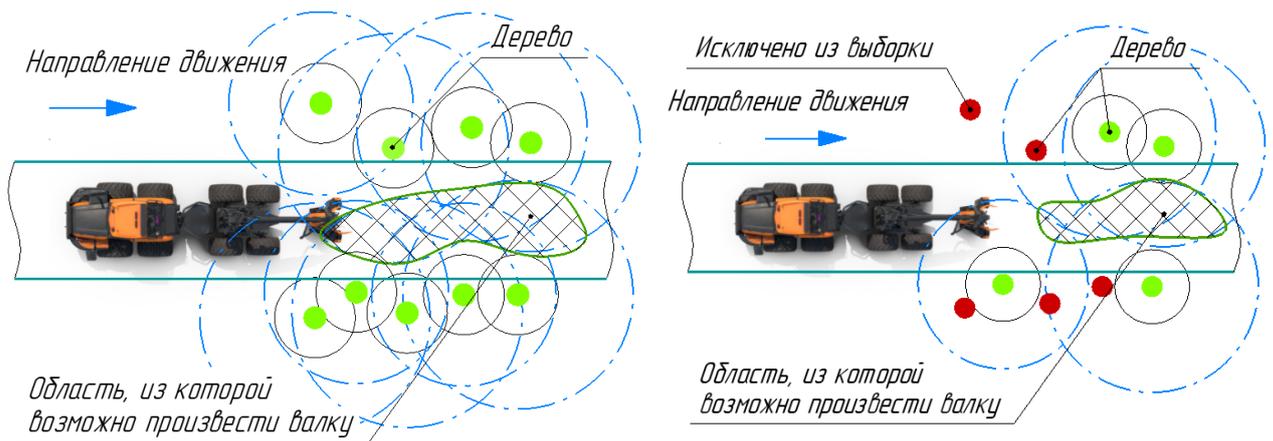
Рабочий процесс оператора ВСРМ характеризуют как циклический процесс вследствие последовательного выполнения следующих технологических операций: наведение стрелы манипулятора, захват дерева, валка дерева, раскряжёвка хлыста, перемещение на следующую рабочую площадку.

Продолжительность выполнения операций зависит от технических характеристик технологического оборудования ВСРМ, но для таких операций, как «наведение стрелы манипулятора» и «перемещение на следующую рабочую площадку», важен и человеческий фактор. Рациональное позиционирование ВСРМ относительно деревьев при выполнении «валки дерева» влияет на продолжительность наведения манипулятора на ствол дерева и на продолжительность поворота манипулятора при выполнении «раскряжёвки хлыста». Стоит отметить, что для неопытного оператора процесс выбора деревьев при выборочной рубке может занять значительное время в сравнении с более опытным оператором, что подтверждается рядом исследований.

Предполагаемая эффективность разрабатываемой системы основана на рациональном выборе места технологической остановки при проведении «валки дерева», что в свою очередь также должно уменьшить продолжительность поворотов и наведение стрелы манипулятора.

Сущность работы системы заключается в извлечении таксационных параметров дерева, необходимых для валки, с помощью алгоритмов машинного зрения. Ключевыми параметрами являются: угол наклона ствола, масса дерева, а также его пространственное положение относительно лесозаготовительной машины. На основе грузоподъёмности манипулятора система определяет допустимые зоны валки вокруг каждого дерева, то есть области, в которых машина может находиться и выполнять валку.

На Рисунке 1 представлена иллюстрация работы системы при сплошной рубке (А) и выборочной (Б). Пространственное совмещение зон валки всех деревьев на цифровой карте местности позволяет выявить оптимальные зоны, из которых возможно произвести валку максимального количества деревьев за один подход. В случае выборочных рубок возможно заранее задать критерии отбора деревьев на основе их таксационных параметров, что ускоряет процесс принятия решения оператором, особенно в случаях его низкой квалификации.



а – Сплошная рубка

б – Выборочная рубка

Рисунок 1 – Иллюстрация сценариев работы системы

Для реализации данной системы предполагается использование ЭВМ, лазерных сканеров и устройства вывода информации (монитор). Критически важным аспектом, обеспечивающим повышение производительности оператора лесозаготовительной машины, является эффективный способ представления информации. На начальном этапе разработки предусмотрена реализация пользовательского интерфейса на дополнительном экране, установленном в кабине машины. Графическая интерпретация интерфейса системы представлена на Рисунке 2.

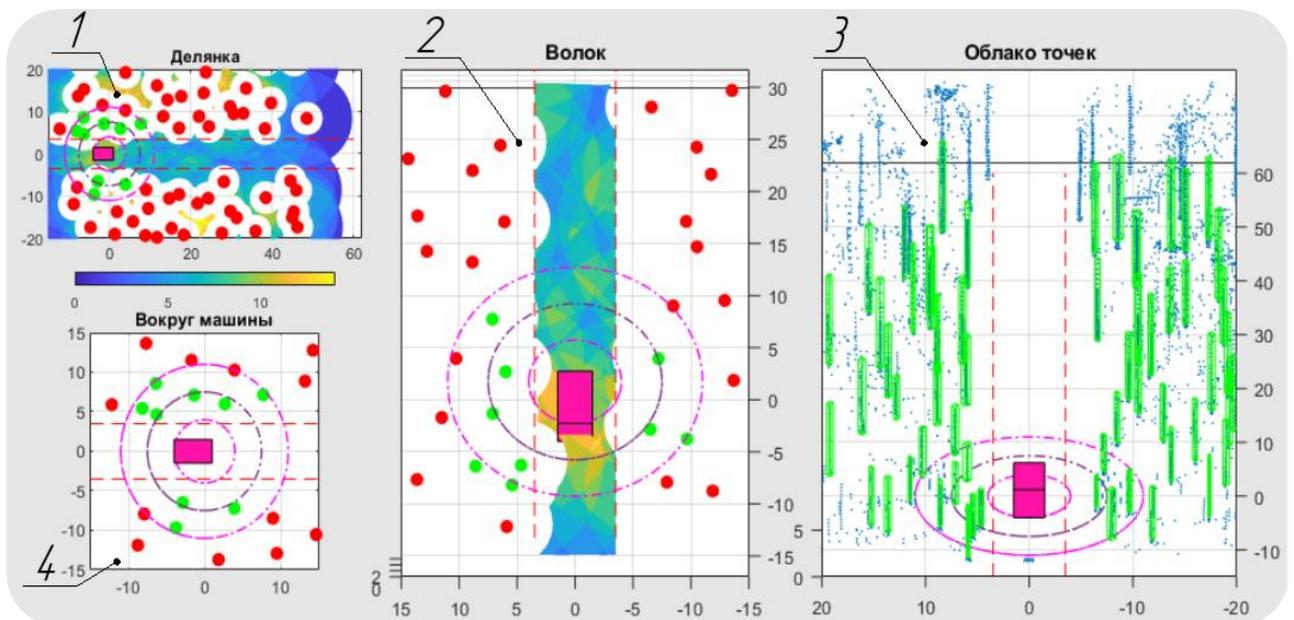


Рисунок 2 – Концепт интерфейса

На Рисунке 2 приняты следующие обозначения: 1 – ортогональная проекция участка леса с идентифицированными деревьями и визуализацией градиентов зон валки; 2 – изометрическая проекция волока с идентифицированными деревьями и визуализацией градиента зон валки вдоль траектории движения лесозаготовительной машины; 3 – изометрическая проекция отсканированного участка леса с отображением пространственного распределения стволов

деревьев; 4 – ортогональная проекция зоны досягаемости манипулятора. Красным цветом обозначены деревья, находящиеся вне зоны досягаемости стрелы манипулятора, а зелёным – в пределах. Две параллельные линии обозначают ширину волока, по которому перемещается лесозаготовительная машина. Окружности с центром в начале системы координат, отображаемые штрихпунктирной линией, характеризуют максимальный, рабочий и минимально допустимый вылет стрелы манипулятора. На видах 1 и 2 градиентом цвета визуализируются допустимые зоны валки деревьев, причём интенсивность цвета соответствует количеству деревьев, доступных для валки в данной зоне.

Структура работы системы (Рис. 3) предполагает последовательное выполнение следующих операций: наземное сканирование участка леса, фильтрация облака точек (удаление точек, не относящихся к стволу дерева), обработка точек (сегментация деревьев из облака точек и определение параметров) с использованием методов компьютерного зрения, а также визуализация информации на мониторе.

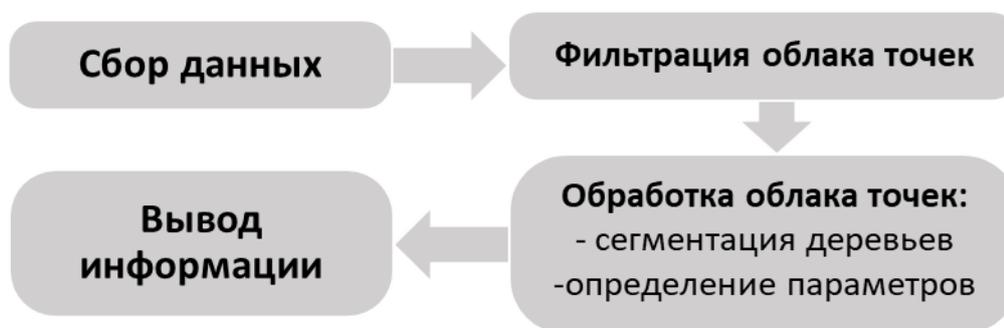


Рисунок 3 – Структура разрабатываемой системы

Предложена математическая модель для аналитической оценки количества лучей лазерного сканера LiDAR, пересекающих ствол дерева, данная модель служит теоретической основой для обоснования возможности применения сканера LiDAR. Модель учитывает геометрические параметры дерева и технические характеристики сканера, а также расположение дерева относительно него. Данная модель использовалась для аналитической оценки технических характеристик лазерного сканера LiDAR и мест размещения сканера на базовой машине. Расчётные схемы представлены в тексте диссертации. Моделирование древесного ствола основано на модифицированном уравнении Каплиной Н.Ф. и Лебкова Н.Ф., выбор уравнения обуславливается простотой использования в решении задач аналитической геометрии:

$$Z(r_i) = \frac{2 \cdot H}{2 \left(\frac{r_i}{q_2 \cdot r_{1,3}} \right) + 2 \left(\frac{r_i}{q_2 \cdot r_{1,3}} \right)^{c_2}}, \text{ мм} \quad (1)$$

где H – высота дерева, мм; r_i – рассматриваемый радиус, мм; $r_{1,3}$ – радиус ствола дерева на высоте 1,3 м, мм; q_2 – коэффициент формы; c_2 – параметр формы.

Результаты аналитических расчётов, представленные в диссертации, показали возможность использования лазерных сканеров с горизонтальным шагом сканирования не более $0,09^\circ$. Для оптимальной работы системы возможна

установка сканера с вертикальным полем зрения в 30° на кабине на высоте 3 м и сканера с горизонтальным полем зрения в 120° под кабиной на высоте 1,5 м. Помимо этого, в диссертационной работе представлены упрощённые методики обоснования выбора горизонтального и вертикального углового разрешения LiDAR-сенсора в рамках двумерной геометрической модели.

В диссертационной работе проведён сравнительный анализ методов определения диаметра поперечного сечения ствола дерева, основанных на аппроксимации окружности методами Kasa, Pratt, Taubine и RANSAC (по трём и четырём точкам выборки) и итерационных методов определения угла наклона выделенного сегмента ствола дерева, основанных на выделении геометрических примитивов из точек, таких как конус, цилиндр и нормали.

Иллюстрация определения диаметра представлена на Рисунке 4. В таблице 1 представлены результаты определения среднего отклонения расчётного значения диаметра от измеренного мерной вилкой, значения в скобках соответствуют погрешности для доверительного интервала с уровнем доверия в 95 %. Параметры распределения диаметров выборки из 50 деревьев и методика проведения исследования представлены в диссертационной работе.

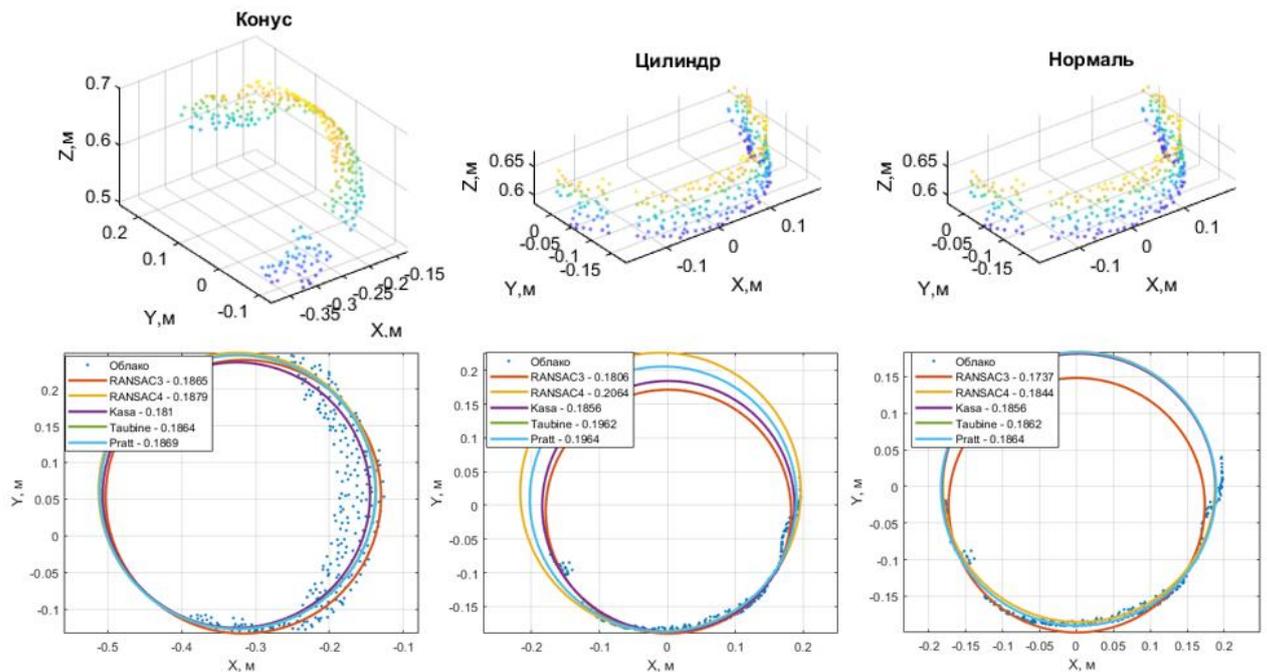


Рисунок 4 – Определение диаметра

Таблица 1 – Результаты расчета отклонений

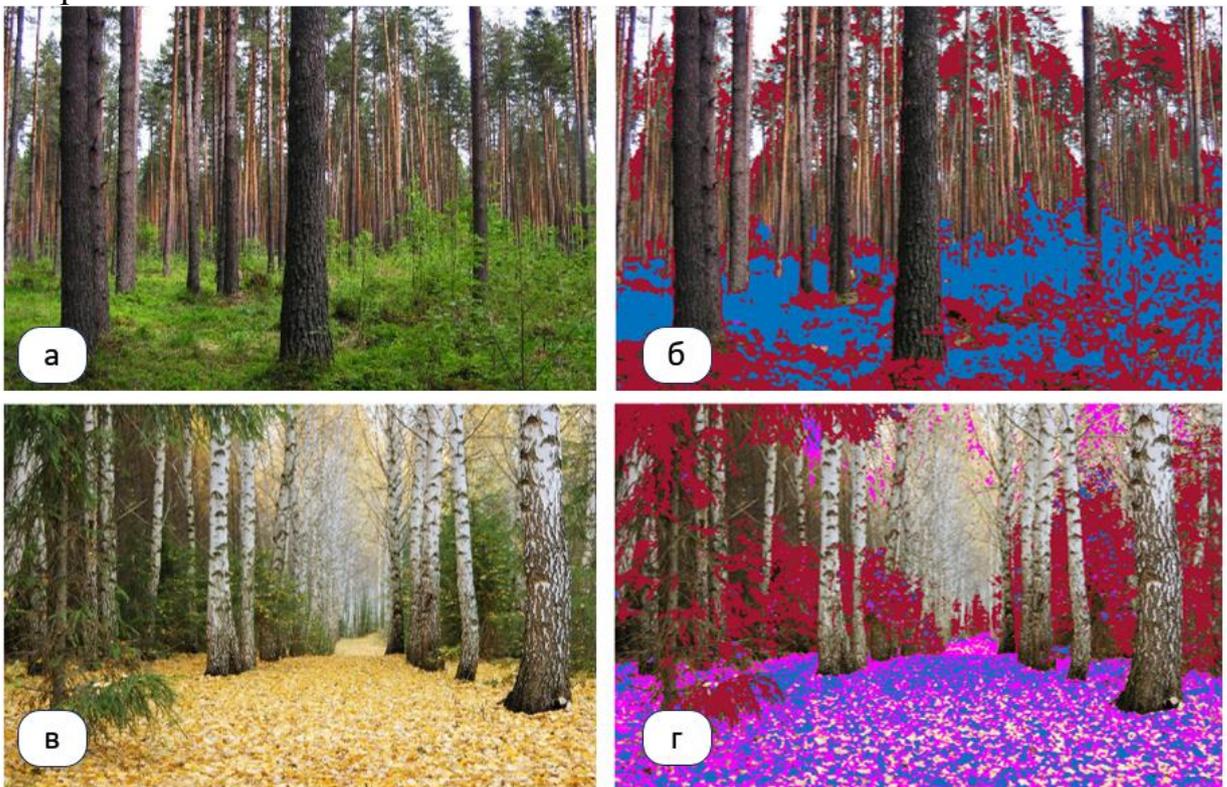
Метод	RANSAC-3	RANSAC-4	Kasa	Taubine	Pratt
Наклон по конусу	0,719(±0,024)	0,662(±0,096)	0,713(±0,076)	0,668(±0,096)	0,674(±0,095)
Наклон по цилиндру	1,031(±0,024)	0,999(±0,032)	1,006(±0,024)	1,001(±0,022)	1,002(±0,022)
Наклон через нормали	1,007(±0,024)	1,007(±0,022)	1,014(±0,023)	1,005(±0,018)	1,006(±0,018)

Анализ результатов сравнения методов аппроксимации окружности в сочетании с методами определения угла наклона ствола дерева показал, что реализованные методы, основанные на аппроксимации цилиндром и оценке нормали к поверхности ствола, демонстрируют более высокую стабильность по сравнению с методом, основанным на аппроксимации конусом.

Сравнительный анализ методов RANSAC показал, что алгоритм, использующий четыре точки для аппроксимации окружности, демонстрирует более высокую стабильность по сравнению с алгоритмом, использующим три точки. Наиболее эффективным и стабильным оказалось сочетание метода определения угла наклона ствола с помощью нормалей и метода аппроксимации поперечного сечения ствола с помощью метода Taubine.

Третья глава диссертации посвящена практической реализации системы поддержки принятия решений оператора ВСПМ. В частности, в главе рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением базовой функциональности системы, а именно реализацией алгоритмов фильтрации шумов облаков точек, обучением нейронной сети для сегментации стволов деревьев и построением математической модели цифровой карты местности.

Для фильтрации шумов в облаках точек предлагается использовать двухэтапный алгоритм. На первом этапе предполагается отсеять точки, относящиеся к листве, фильтрация основана на цветовых моделях Lab и YCbCr. На Рисунке 5 представлена визуализация результатов фильтрации: красный цвет соответствует точкам, отфильтрованным по цветовой модели Lab, фиолетовый - по модели YCbCr, а синий - точкам, прошедшим фильтрацию по обоим пространствам.



а) изображение соснового древостоя; б) результат работы фильтра на изображении соснового древостоя; в) изображение аллеи; г) результат работы фильтра на изображении аллеи.

Рисунок 5 – Работа фильтра на изображениях

Применение ограничений в цветовом пространстве Lab обусловлено необходимостью эффективной сегментации зелёного цвета. Ограничения по каналу a влияют на зелёный цвет, а по каналу b – на оранжевый цвет. Дополнительная фильтрация в цветовом пространстве YCbCr необходима для устранения точек листвы, возникающих в осенний период, когда листья могут иметь схожий цвет с корой верхней части ствола сосны обыкновенной. Для сепарации ярко-оранжевого цвета применяется ограничение по каналу C_b . Ограничения по Lab: $L \in [0; 100]$; $a \in [-5; 35]$; $b \in [-50; 40]$. Ограничения по YCbCr: $Y \in [16; 235]$; $C_b \in [105; 240]$; $C_r \in [16; 240]$.

На втором этапе осуществляется фильтрация точек, относящихся к ветвям деревьев. Для этого проводится анализ значений локальной кривизны, рассчитываемой с помощью собственных значений ковариационной матрицы для каждой точки облака. В работе проведён сравнительный анализ нескольких вариантов фильтров, основанных на пороговом значении кривизны.

Для определения локальной кривизны поверхности в заданной точке необходимо произвести расчёт ковариационной матрицы, рассчитанной по выборке из n ближайших точек. В свою очередь ковариационная матрица характеризует дисперсию и ковариацию координат точек в этой окрестности. Собственные значения λ_j и собственные векторы v_j ковариационной матрицы позволяют оценить направление и степень изменения поверхности в окрестности заданной точки, что служит основой для вычисления локальной кривизны

$$cov = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - lP) \cdot (P_i - lP)^T, \quad (2)$$

где P_i – массив точек; lP – точка, относительно которой все считается, n – количество рассматриваемых точек.

После вычисления ковариационной матрицы производится вычисление её собственных векторов v_j и собственных значений λ_j .

$$cov \cdot v_j = \lambda_j \cdot v_j, j \in \{1, 2, 3\}. \quad (3)$$

Локальное значение кривизны поверхности kr в точки lP определяется как:

$$kr = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}. \quad (4)$$

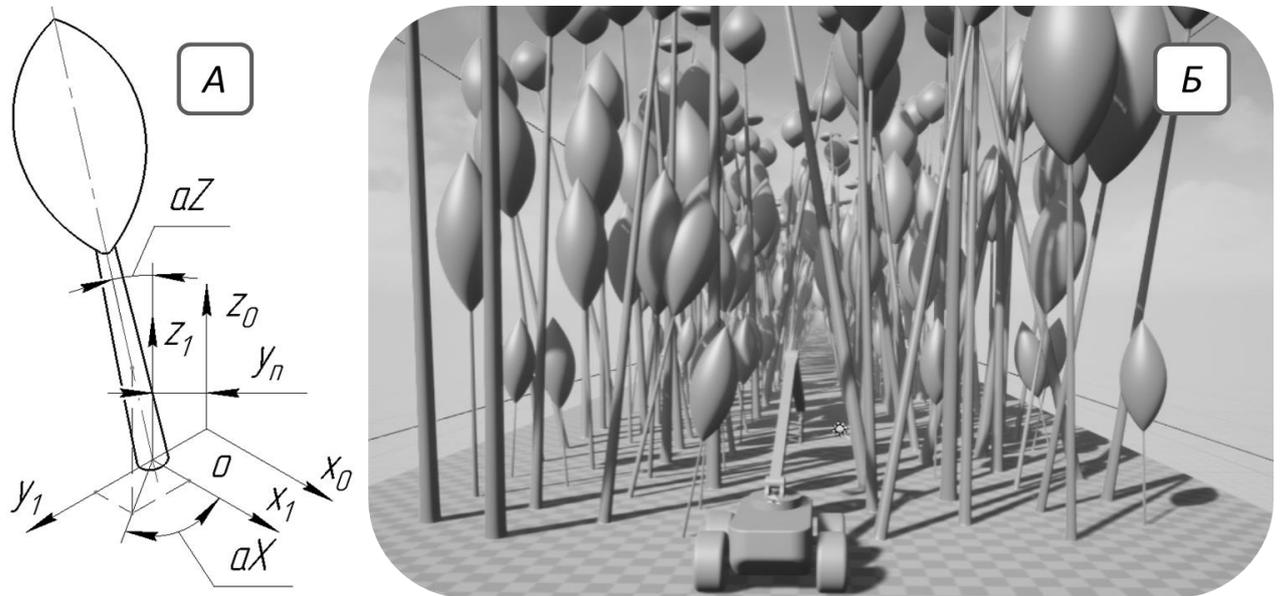
Для фильтрации шумов на основе анализа локальной кривизны предложено три варианта алгоритмов:

1) Фильтрация по пороговому значению кривизны. Если значение кривизны kr в рассматриваемой точке превышает заданное пороговое значение kL , точка классифицируется как шум.

2) Фильтрация по среднему значению кривизны. Для каждой точки определяется n -ое количество ближайших точек, и определяется среднее значение кривизны \overline{kr} по этой выборке. Если \overline{kr} превышает пороговое значение kL , точка классифицируется как шум.

3) Фильтрация по среднеквадратическому отклонению кривизны. Для каждой точки рассчитывается среднее значение кривизны \overline{kr} в её окрестности из n ближайших точек. Затем определяется среднее значение кривизны и стандартное отклонение σ средней кривизны по всему облаку точек. Точка классифицируется как шум, если среднее значение кривизны в её окрестности превышает сумму глобального среднего значения кривизны и стандартного отклонения.

Предложена методика генерации библиотеки синтетических данных LiDAR на основе образующей древесного ствола. Для моделирования процесса лазерного сканирования виртуального лесного участка использован игровой движок Unreal Engine 4.26, обладающий высокой степенью реалистичности визуализации и широкими возможностями для моделирования физических процессов. Пример сгенерированной сцены представлен на Рисунке 6. Подробный алгоритм изложен в тексте диссертационной работы.



а) графическая схема позиционирования модели дерева; б) Пример сцены в Unreal Engine 4

Рисунок 6 – Моделируемая сцена

Для верификации точности сегментации деревьев нейронной сетью «PointPillars», обученной на синтетических данных, все элементы выборки были предварительно подвергнуты обработке, а именно: был удалён шум и облако точек было разрежено таким образом, чтобы минимальное расстояние между точками составляло 1 см. Цель обработки облака точек заключается в преобразовании сканированных сцен к подобию тех на которых происходило обучение.

Результаты сегментации показали, что точность модели (PPV) составляет 0,938, что свидетельствует о высокой доле правильных положительных предсказаний. Это означает, что 93,8% областей, сегментированных как стволы деревьев, действительно содержат точки LiDAR, соответствующие стволам. Однако полнота (TPR) равна 0,586, что указывает на то, что модель обнаруживает только 58,6% реальных стволов. Наилучшие результаты были достигнуты на сценах с меньшей плотностью объектов и более чётко выраженной структурой, в то время как на сценах с большим количеством деревьев и сложной структурой наблюдалось значительное снижение полноты.

Предложена математическая модель карты местности для визуализации мест, из которых возможно производить валку дерева. На Рисунке 7 представлена иллюстрация смоделированной цифровой карты местности, где градиентом цвета визуализируются допустимые зоны валки деревьев, причём интенсивность цвета соответствует количеству деревьев, доступных для валки в данной зоне.

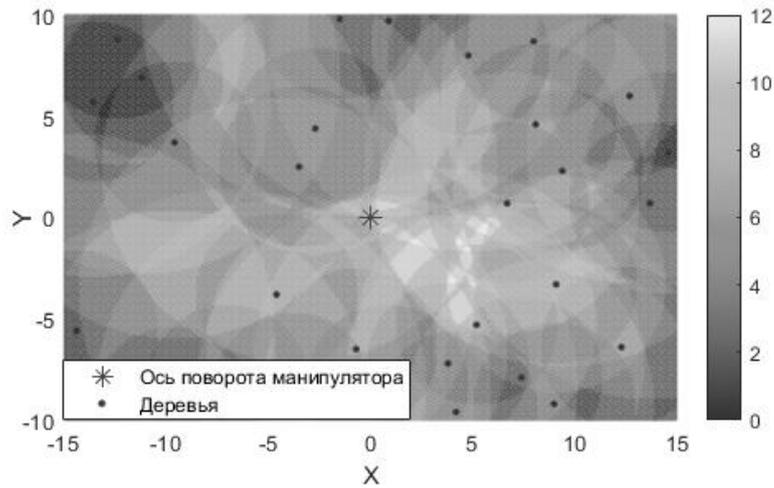


Рисунок 7 – Карта местности

Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям, направленным на верификацию разработанных алгоритмов. В главе детально описаны технические характеристики и процедура калибровки оборудования, использованного для наземного лазерного сканирования лесных участков, включая LiDAR-сенсор Livox Mid-70 и экшн-камеру GoPro HD HERO3 Edition. Глава содержит подробное описание лесных участков, включая их таксационные характеристики, а также карту мест проведения съёмки.

Фильтрация точек представляет собой бинарную классификацию, где каждая точка облака относится к одному из двух классов: "ствол дерева" или "шум". Оценка эффективности фильтрации проводилась с использованием метрик точности классификации: PPV (точность) – доля точек, корректно классифицированных как "ствол дерева", относительно всех точек; TPR (чувствительность или полнота) – доля точек, соответствующих "стволу дерева", которые были корректно классифицированы алгоритмом; F1-мера – гармоническое среднее между точностью и полнотой, представляющее собой обобщённый показатель точности классификации; NPV – доля точек, корректно классифицированных как "шум", относительно всех точек.

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}; TPR = \frac{TP}{TP + FN}; \quad (5)$$

$$F1 = \frac{2 \cdot TP}{2 \cdot TP + FP + FN}; NPV = \frac{TN}{TN + FN}. \quad (6)$$

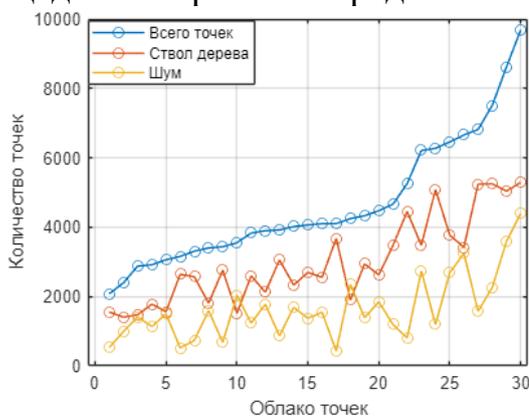
Для верификации эффективности фильтра по цветовым моделям Lab и YCbCr была сформирована выборка из 8 лесных участков, для которых вручную выделены точки, относящиеся к шуму. Сканирование каждого участка осуществлялось в течение трех секунд, после чего полученные облака точек были разрезаны для обеспечения минимального расстояния между точками в 1 см. Результаты расчета метрик точности классификации для фильтра, основанного на цветовой модели представлены в таблице 2, погрешность соответствует уровню доверия в 95 %.

Таблица 2 – Расчетные значения метрик

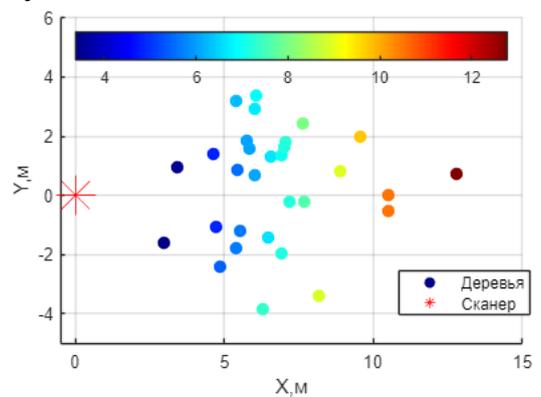
Метрика	PPV	TPR	F1	NPV	Остаток
Среднее значение	0,276	0,885	0,411	0,938	0,650
Стандартное отклонение	0,027	0,036	0,028	0,015	0,056
Погрешность	0,064	0,086	0,065	0,035	0,132

Анализ разработанного фильтра облака точек демонстрирует высокие результаты в задаче сегментации точек, относящихся к стволу дерева. Высокий показатель $TPR = 0,885$ свидетельствует об эффективности алгоритма в выявлении точек, не относящихся к листве, что подтверждает корректность выбранного подхода к сегментации на основе цветовой модели. $NPV = 0,938$ подчёркивает высокую точность алгоритма в идентификации точек листвы, демонстрируя надёжность выбранных критериев для отделения листвы от других элементов лесного массива.

Для оценки эффективности фильтра шума, основанного на анализе локальной кривизны, была сформирована выборка из 30 сегментированных деревьев и вручную выделены точки, относящиеся к шуму. Облака точек были разрежены для обеспечения минимального расстояния в 1 см. Характеристики выборки представлены на Рисунке 8(а). Распределение выборки деревьев по площади сканирования представлено на Рисунке 8(б).



а – Элементы выборки



б – Распределение деревьев

Рисунок 8 – Характеристики выборки

Оптимизация параметров фильтров, основанных на анализе локального значения кривизны, проводилась путём перебора следующих значений: n – количество соседних точек, используемых для расчета кривизны: от 3 до 100 точек с шагом 1 точка; пороговое значение кривизны kL : от 0,001 до 0,3 с шагом 0,001.

Анализ трех методов фильтрации выявил преимущество фильтрации по среднему значению выборки и пороговому значению кривизны. Фильтрация по пороговому значению кривизны $kL = 0,056$ и выборки из $n = 46$ точек, показала наилучшие результаты, демонстрируя высокое значение F1-меры (0,808) и отрицательной прогностической ценности NPV (0,8). Это свидетельствует о её способности эффективно идентифицировать как истинные положительные, так и истинные отрицательные случаи, обеспечивая оптимальный баланс между точностью и полнотой. Фильтрация по пороговому значению и среднеквадратическому отклонению показали менее стабильные и менее точные результаты.

Для теоретической оценки влияния системы поддержки принятия решений на производительность оператора лесозаготовительной машины были смоделированы одноярусные и одновозрастные древостои, состав пород от 10С до 6С4Б с шагом в 10%, в возрасте от 80 до 120 лет с шагом в 10 лет, таксационные параметры соответствуют таблицам модальных древостоев Европейской части России, моделирование распределения диаметра основано на данных А.Г. Мошкалева, полнота древостоя рассматривалась в диапазоне от 0,6

до 1 с шагом 0,1, расположение деревьев моделировалось по равномерному распределению с ограничением по площади питания, для каждого уникального сочетания таксационных параметров рассматривалось 100 вариантов распределения деревьев, что в общей сложности составило 50 тысяч смоделированных делянок.

Критерием оценки производительности Δ было выбрано отношение сменной производительности $\Pi_{см2}$ ВСРМ, оборудованной системой поддержки принятия решений, к сменной производительности $\Pi_{см1}$ ВСРМ, не оборудованной системой поддержки принятия решений, т.е. $\Delta = \Pi_{см2}/\Pi_{см1}$.

Реализация алгоритма перемещения ВСРМ по делянке под управлением человека достаточно субъективна, вследствие этого поставленную задачу предполагается решить с рядом допущений, а именно: машина под управлением оператора с системой поддержки и без неё ограничена в перемещении и может двигаться только вперёд, оператор, управляющий машиной без системы поддержки принятия решений, выбирает место остановки на основе данных о максимальном и минимальном вылете манипулятора, оператор, управляющий машиной, оборудованной системой поддержки принятия решений, выбирает место технологической остановки на основе данных грузоподъёмности манипулятора. На Рисунке 9 представлена взаимосвязь производительности с расстоянием между деревьями и брутто (масса дерева, харвестерной головки и ротатора). В качестве технологического оборудования был выбран манипулятор Waratah CH710 и харвестерная головка Waratah H412.

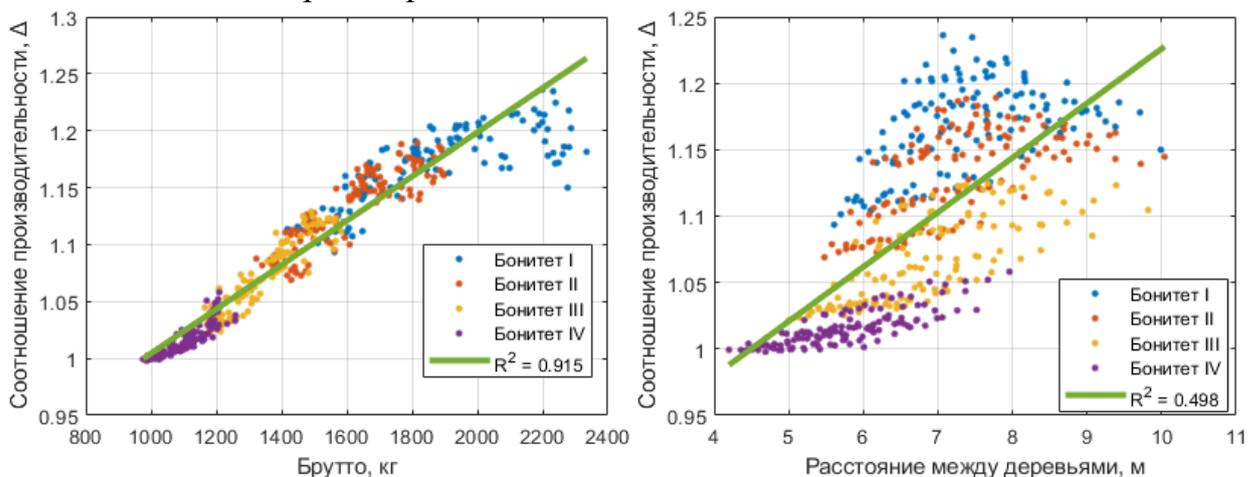


Рисунок 9 – Результаты расчета соотношения производительности

Для удобства интерпретации полученных данных введён коэффициент масштаба K_m , который характеризует соотношение массы брутто к максимальной грузоподъёмности манипулятора на максимальном вылете. Регрессионный анализ (Рис. 10) выявил линейную корреляцию между коэффициентом масштаба K_m и относительным приростом производительности Δ . Высокое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,946$ подтверждает значительное влияние степени загрузки манипулятора на эффективность применения системы поддержки принятия решений. Результаты математического моделирования показали устойчивое увеличение сменной производительности ВСРМ, оборудованной системой поддержки. Среднее значение Δ по всем моделируемым сценариям составило 1,096, что свидетельствует о повышении производительности на 9,6% при работе с

системой. Анализ средних значений прироста производительности по бонитетам показал следующие результаты: для I бонитета – 16,8%, для II бонитета – 13,3%, для III бонитета – 6,8% и для IV бонитета – 1,1%.

Система поддержки наиболее эффективно оптимизирует рабочий процесс в условиях, когда масса брутто груза не превышает 110% ($K_m < 1,1$) от максимальной грузоподъёмности манипулятора на максимальном вылете. Данный фактор взаимосвязан с грузоподъёмностью манипулятора на максимальном вылете. Благодаря высокой грузоподъёмности возможно производить валку большего количества деревьев за одну остановку на максимальном вылете манипулятора. В этом случае влияние выбора позиции на общую производительность менее значительно.

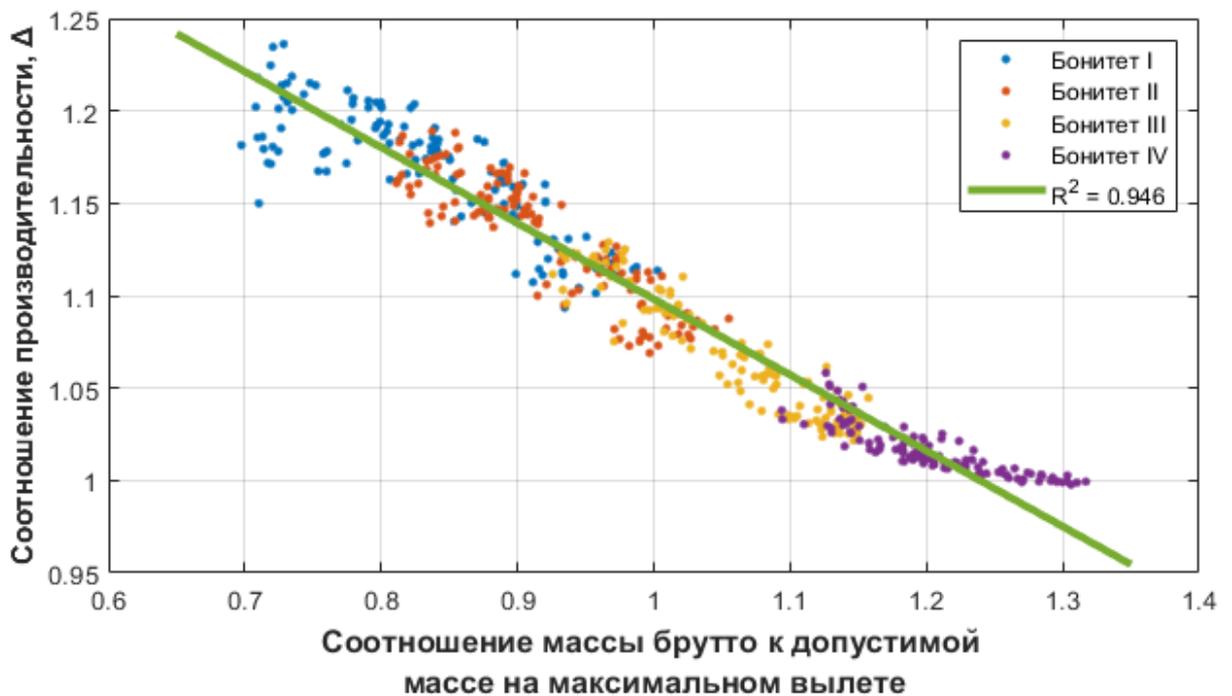


Рисунок 10 – Взаимосвязь между коэффициентом масштаба K_m и относительным приростом производительности Δ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель для аналитической оценки количества лазерных лучей, пересекающих ствол дерева при сканировании LiDAR, данная модель служит теоретической основой для обоснования возможности применения сканера LiDAR в целях автоматизации и информатизации управления лесозаготовительной машиной. Результаты аналитических расчётов показали возможность использования лазерных сканеров с горизонтальным шагом сканирования не более $0,09^\circ$. Для оптимальной работы системы возможна установка сканера с вертикальным полем зрения в 30° на кабине на высоте 3 м и сканера с горизонтальным полем зрения в 120° под кабиной на высоте 1,5 м.

2. Разработан фильтр облака точек, использующий цветовые модели YCbCr и Lab, способный эффективно выделить точки, относящиеся к стволам деревьев ($TPR=0,885$, $NPV=0,938$), что свидетельствует об успешном удалении точек, относящихся к листве. Применение фильтра позволяет сократить общее

количество точек в среднем на 35%, что делает его оптимальным инструментом предварительной обработки данных для анализа структуры лесных массивов.

3. Сравнительный анализ методов фильтрации, основанных на значении локальной кривизны, показал, что алгоритм, сочетающий фильтрацию по среднему значению выборки и пороговому значению кривизны, обладает наибольшей эффективностью. Применение порогового значения кривизны $kL=0,056$ и выборки из $n=46$ точек обеспечивает высокое значение F1-меры = 0,808 и NPV 0,8, что свидетельствует о высокой точности и полноте метода в селективном удалении точек, соответствующих ветвям деревьев.

4. Метод сегментации деревьев с использованием нейронной сети PointPillars, обученной на синтетических данных, показал высокую точность обнаружения стволов деревьев (PPV=0,938), что подтверждает перспективность использования синтетических данных для обучения нейронной сети.

5. Результаты математического моделирования показали устойчивое увеличение сменной производительности ВСРМ. Среднее значение Δ по всем моделируемым сценариям составило 1,096, что свидетельствует о повышении производительности на 9,6% при работе с системой. Установлено, что прирост производительности больше 5% наблюдается в случаях, когда масса груза не превышает 110% от максимальной грузоподъёмности манипулятора на максимальном вылете. Средний прирост производительности по бонитетам: I – 16,8%, II – 13,3%, III – 6,8% и IV – 1,1%.

6. Разработанные методики и алгоритмы, полученные в результате работы над диссертацией, внедрены в образовательный процесс МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана и в рабочий процесс предприятия ООО «ЛЕСТЕХ-ФИНАНС», что подтверждается соответствующими актами.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Рогачев Д. И., Клубничкин В. Е. Реализация сегментации деревьев для системы поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4(60). С. 169-175. (0,38 п.л./0,25 п.л.). (Автор произвёл моделирование и обучил нейронную сеть).

2. Рогачев Д. И., Козлов И. В., Клубничкин В. Е. Фильтрация шумов сканируемого LiDAR участка леса на основе цветовых моделей YCbCr и Lab* // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 4 (52). Ч. 1. С. 125–139. (0,25 п.л./0,15 п.л.). (Автор разработал алгоритм фильтрации на основе цветовых моделей YCbCr и L*a*b*).

3. Клубничкин В. Е., Клубничкин Е. Е., Рогачев Д. И. Автоматизация технологических процессов лесозаготовительной машины // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 12. С. 114-117. (0,19 п.л./0,09 п.л.). (Автор разработал концепцию ассистента оператора).

4. Рогачев Д. И. Система поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611047. Заявл. 08.01.2024. Оpubл. 17.01.2024.

5. Рогачев Д. И. Фильтр точек облака точек для наземного сканирования леса. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611664. Заявл. 11.01.2024. Опубл. 23.01.2024.

6. Рогачев Д. И. Фильтр трехмерных точек, основанный на расстоянии для облака точек, полученного при наземном сканировании участка леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XXI Международной научно-технической конференции, Вологда, 5 декабря 2023 года. Вологда. 2023. С. 265-268. (0,19 п.л.)

7. Рогачев Д. И. Концепция системы поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины // Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 5 октября 2023 года. Воронеж. 2023. С. 120-124. (0,25 п.л.)

8. Рогачев Д. И. Влияние горизонтального шага сканирования lidar на определение диаметра дерева // Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 5 октября 2023 года. Воронеж. 2023. С. 204-208. (0,25 п.л.)

9. Рогачев Д. И. Цифровой ассистент оператора лесозаготовительной машины // Студенческая научная весна: Тезисы докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 175-летию Н.Е. Жуковского, Москва, 1–30 апреля 2022 года. Москва. 2022. С. 602-603. (0,06 п.л.)

10. Рогачев Д. И. Краткий анализ возможного расположения лазерного сканера LIDAR на лесозаготовительной машине // Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 5 октября 2023 года. Воронеж. 2023. С. 60-63. (0,19 п.л.)

11. Рогачев Д. И. Применение синтетического облака точек для обучения нейронной сети pointpillars // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. Санкт-Петербург. 2023. С. 431-433. (0,13 п.л.)

12. Рогачев Д. И. Определение диаметра ствола дерева с использованием лазерного сканера (lidar) // Ежегодная национальная (с международным участием) научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2022 г.: Материалы конференции, Мытищи, 30 января - 1 февраля 2023 года. Мытищи. 2023. С. 191-193. (0,13 п.л.)