

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 519.876.5:630

DOI 10.17513/snt.40534

**БЕСПИЛОТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ:
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И БАРЬЕРОВ ВНЕДРЕНИЯ****Галкин Д.В., Петухов И.В., Стешина Л.А., Танрывердиев И.О.***ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,
Россия, Йошкар-Ола, e-mail: GalkinDV@volgatech.net*

В условиях необходимости повышения эффективности лесозаготовительных операций актуально изучение потенциала автономных транспортных систем для работы в сложной лесной среде. Цель настоящего исследования – проанализировать современные технологии автоматизации транспортных процессов в лесном хозяйстве и выявить ключевые барьеры их внедрения в российскую лесную промышленность. Метод аналитического исследования включает систематический обзор отечественных и зарубежных публикаций о сенсорных технологиях, алгоритмах автономной навигации и методах машинного обучения, а также анализ нормативно-правовых и инфраструктурных факторов. В ходе исследования проанализировано применение лидарного сканирования, систем картографирования, интеграции мультисенсорных модулей и алгоритмов искусственного интеллекта для траекторного планирования. Установлено, что основные ограничения определяются низкой надежностью спутникового позиционирования под лесным пологом, нестабильностью грунтовых условий, сезонной непроходимостью и отсутствием регламентированной нормативной базы. На основе выявленных факторов предложена концепция адаптивной лесотранспортной системы, включающая мультимодальные сенсорные архитектуры и гибридные алгоритмы навигации с элементами предиктивного анализа дорожного полотна. Вывод: предложенный подход обеспечивает основу для дальнейшей разработки дорожной карты цифровизации лесного комплекса с учетом технологических, социально-экономических и нормативных ограничений.

Ключевые слова: автономная транспортная система, лесозаготовительная техника, LiDAR-сканирование, машинное обучение, компьютерное зрение

**UNMANNED TECHNOLOGIES IN FORESTRY: ANALYSIS
OF CURRENT SOLUTIONS AND BARRIERS TO IMPLEMENTATION****Galkin D.V., Petukhov I.V., Steshina L.A., Tanryverdiev I.O.***Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola,
e-mail: GalkinDV@volgatech.net*

Given the need to improve the efficiency of logging operations, it is important to study the potential of autonomous transport systems for operation in complex forest environments. The aim of this study is to analyze modern technologies for automating transport processes in forestry and to identify the key barriers to their implementation in the Russian forestry industry. The analytical research method includes a systematic review of domestic and foreign publications on sensor technologies, autonomous navigation algorithms, and machine learning methods, as well as an analysis of regulatory, legal, and infrastructure factors. The study analyzed the use of lidar scanning, mapping systems, the integration of multi-sensor modules, and artificial intelligence algorithms for trajectory planning. It was found that the main limitations are determined by the low reliability of satellite positioning under forest canopy, unstable soil conditions, seasonal impassability, and the lack of a regulated regulatory framework. Based on the identified factors, a concept for an adaptive forest transport system has been proposed, including multimodal sensor architectures and hybrid navigation algorithms with elements of predictive road surface analysis. Conclusion: The proposed approach provides a basis for further development of a roadmap for the digitalization of the forestry complex, taking into account technological, socio-economic, and regulatory constraints.

Keywords: autonomous transport system, logging machinery, LiDAR scanning, machine learning, computer vision

Введение

Лесозаготовительный сектор Российской Федерации находится в фазе технологической трансформации, обусловленной совокупностью факторов, включая перераспределение трудовых ресурсов на рынке занятости, условия масштабных геополитических санкций против национальной экономики, регуляторную нагрузку и экономические условия [1].

К основным системным проблемам лесозаготовительной отрасли Российской Федерации, которые оказывают существенное влияние на развитие данной отрасли, можно отнести:

– моральный и физический износ парка специализированной техники: средний срок эксплуатации харвестеров и форвардеров значительно превышает нормативные показатели, а затраты на модернизацию техно-

парка недоступны для большинства лесозаготовительных предприятий;

- структурные проблемы отрасли (по данным Ю.Ш. Блам [1]), такие как хроническое недофинансирование технологического обновления, устойчивая тенденция оттока квалифицированных операторов, необходимость адаптации импортных технических решений к специфическим условиям российских лесных массивов;

- экономические и технологические аргументы автоматизации. Известно, что внедрение даже базовых автоматизированных систем позволяет повысить производительность технологических процессов на 15–20 %, снизить потребление топлива на 8–12 % и уменьшить интенсивность износа узлов и агрегатов [2]. Согласно анализу McEwan [3] уже к 2025 г. произойдет массовое внедрение систем GPS-навигации и дистанционного управления, а к 2030–2035 гг. прогнозируется появление полностью автономных лесозаготовительных комплексов;

- технологические барьеры и перспективы развития, включающие высокую капиталоемкость автономных решений, необходимость разработки адаптивных алгоритмов для работы в сложных природных условиях, отсутствие нормативной базы для эксплуатации беспилотной техники.

Переход к автоматизированным системам лесозаготовки представляет собой стратегическую необходимость для российской лесной отрасли, однако успешная реализация этого перехода требует комплексного решения технологических, экономических и нормативных задач. В этих реалиях внедрение беспилотных технологий лесозаготовки переходит из категории инновационных возможностей в разряд стратегически необходимой меры для обеспечения конкурентоспособности отрасли [4, 5].

Особую актуальность приобретает разработка автономных лесных транспортных систем, способных эффективно функционировать в условиях сложного бездорожья. Современные достижения в области датчиковых технологий, систем автономной навигации и искусственного интеллекта создают принципиально новые возможности для автоматизации процессов транспортировки древесины [6, 7]. Реализация таких решений позволит не только минимизировать зависимость от человеческого фактора, но и существенно оптимизировать всю цепочку лесозаготовительных операций.

В рамках данного исследования проводится анализ существующих технических

решений в области автономного лесного транспорта, а также выявляются ключевые технологические барьеры, требующие преодоления для успешной коммерциализации подобных систем.

Цель исследования – разработать научно обоснованную концепцию адаптивной лесотранспортной системы, обеспечивающую эффективное внедрение беспилотных технологий в условиях российского лесного хозяйства с учетом технологических, организационных и нормативных ограничений.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено методом системного анализа отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных автономным транспортным системам в лесном хозяйстве. Проведен тщательный обзор современных сенсорных технологий (LiDAR-сканирование, спутниковые навигационные системы и др.), алгоритмов автономной навигации (включая SLAM-картографирование), а также методов искусственного интеллекта (машинное обучение, компьютерное зрение) для восприятия окружающей среды и планирования маршрутов. Помимо этого, рассмотрен практический опыт применения беспилотных систем в смежных отраслях и проанализированы организационно-нормативные факторы, влияющие на внедрение данных технологий в российских условиях.

В сегодняшнем научном мире одной из наиболее широко применяемых технологий дистанционного зондирования является технология LiDAR (Light Detection and Ranging), позволяющая создавать высокоточные трехмерные модели лесных массивов для целей навигации и пространственного анализа [8].

К основным преимуществам технологии LiDAR-сканирования относится высокая точность построения трехмерных моделей [9] с погрешностью, не превышающей 5 см, даже в условиях высокой плотности подлеска. Кроме того, данная технология способна дифференцировать типы растительности и оценивать проходимость отдельных участков местности, что имеет существенное значение для планирования лесозаготовительных операций [10, 11].

Однако технология обладает рядом существенных недостатков, включая значительную стоимость специализированного оборудования, что ограничивает ее широкое применение [12]. Также отмечается снижение эффективности работы в неблагоприятных погодных условиях, таких как дождь, туман или повышенная запыленность атмос-

феры. Еще одним ограничением является необходимость использования мощных вычислительных ресурсов для обработки больших массивов данных, а также затрудненность их интерпретации в условиях динамически изменяющейся окружающей среды [13].

Согласно исследованию Kaartinen и коллег [14], точность позиционирования, обеспечиваемая GNSS-системами под лесным пологом, может снижаться до 5–15 м, что делает их непригодными для точной навигации лесной техники. В связи с этим авторы рекомендуют внедрение гибридных навигационных систем, комбинирующих спутниковые технологии с инерциальными измерительными модулями и LiDAR-сканированием. Такой подход позволяет компенсировать ограничения отдельных методов и повысить общую надежность навигации в сложных лесных условиях.

Перспективным направлением является применение геоинформационных систем с интеграцией данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов [15]. Данная технология обладает рядом преимуществ, включая возможность оперативного обследования обширных лесных массивов и доступ к труднодоступным территориям. Кроме того, она демонстрирует более высокую экономическую эффективность по сравнению с традиционными методами аэрофотосъемки. Однако при ее использовании возникают определенные сложности, такие как значительные первоначальные затраты, ограниченное время полета из-за емкости аккумуляторов, зависимость от погодных условий и наличие нормативных ограничений на применение БПЛА. Дополнительным фактором, затрудняющим внедрение технологии, является необходимость обработки больших объемов данных, что требует значительных вычислительных мощностей и привлечения квалифицированных специалистов.

Значительный интерес представляет применение методов глубокого обучения для автоматизированного анализа данных лазерного сканирования с целью идентификации лесных дорог [16]. Эта технология отличается высокой производительностью, позволяя обрабатывать участки площадью до 4 км² всего за 5 с. Тем не менее ее практическому использованию препятствуют такие факторы, как недостаточный объем обучающих данных, необходимость предварительной обработки исходной информации [17], сложности адаптации к различным типам лесных массивов, а также снижение точности

в условиях густого подлеска и сложного рельефа местности.

Для решения проблемы интеграции данных из различных источников лазерного сканирования, характерной для ранее рассмотренных технологий, Cheng и соавт. [18] разработали инновационную методику регистрации облаков точек [19]. Данный подход позволяет объединять информацию, полученную с различных платформ, включая воздушные, транспортные, наземные и спутниковые LiDAR-системы, что существенно расширяет возможности сенсорных систем. Однако исследователи отмечают ряд существенных ограничений этой технологии, таких как сложности обработки неоднородных данных, высокие требования к вычислительным ресурсам при работе с масштабными облаками точек, повышенная чувствительность к шумам и вариациям плотности точек, а также отсутствие стандартизированных наборов данных и унифицированных систем оценки.

Системы локализации и ориентации играют ключевую роль в обеспечении автономного движения лесных машин. Важным аспектом создания карт местности является понимание датчикового оборудования, используемого для получения исходных данных. Как показано в исследовании [20], современные лесные роботизированные системы преимущественно оснащаются следующими типами датчиков: лидарными сканерами, RGB-камерами, RTK/GNSS/INS-системами, тепловизионными камерами, датчиками окружающей среды, стереокамерами, а также гиперспектральными и мультиспектральными камерами [21, 22].

Мультисенсорная интеграция данных значительно повышает надежность систем локализации в условиях ограниченной видимости, типичных для лесных массивов. Это подтверждается исследованиями Vyantas Ušinskis и коллег [3], которые рассматривают комбинирование данных от лидаров, инерциальных измерительных блоков (IMU), одометрии и GNSS-приемников с применением расширенного фильтра Калмана в качестве ключевого подхода к обеспечению стабильной локализации лесной техники. Хотя такой подход демонстрирует устойчивость к временным потерям сигналов отдельных датчиков, он имеет существенные ограничения, включая сложность калибровки системы, повышенные требования к вычислительным ресурсам и значительную стоимость реализации.

Альтернативное решение для снижения затрат на систему локализации пред-

ложили Gupta и Andreasson [23]. Их метод регистрации сканов для навигации в лесной среде основан на использовании низкоразрешающих лидарных датчиков. Основное преимущество данного подхода заключается в возможности применения более доступных по стоимости датчиков, что существенно снижает общие расходы на систему. Однако следует учитывать, что такой компромисс приводит к уменьшению точности работы в условиях особенно густых лесных массивов.

В дополнение к техническим решениям, в работе И.В. Петухова и коллег [24] рассматривается применение технологий виртуальной и дополненной реальности в профессиональной подготовке операторов эргатических систем. Цель данного подхода – повысить эффективность обучения персонала за счет иммерсивного моделирования реальных условий: оператор тренируется в виртуальной среде, имитирующей взаимодействие с оборудованием, что позволяет отрабатывать навыки управления и принятия решений без риска для реальной техники. В исследовании особое внимание уделено проблемам применения VR/AR, связанным с вероятным когнитивным диссонансом у операторов при переходе от виртуального тренинга к работе с реальными физическими объектами. Однако VR-системы характеризуются рядом технических ограничений. К ним относятся высокая стоимость необходимого оборудования и сложность разработки достоверных виртуальных сценариев. Кроме того, такие тренажеры не обеспечивают осязательной обратной связи, а у пользователей возможно возникновение дискомфорта.

В отличие от статичной и предсказуемой городской инфраструктуры, лесная среда характеризуется высокой динамичностью и изменчивостью. Маршрут, проходимый сегодня, уже завтра может оказаться заблокированным вследствие естественных природных процессов – падения деревьев, размыва почвы или деятельности животных. В связи с этим современные беспилотные системы все чаще используют алгоритмы машинного обучения и нейронные сети, способные решать комплексные задачи восприятия окружающей среды, принятия решений и динамического планирования маршрутов.

Нейросетевые алгоритмы демонстрируют значительные преимущества в оптимизации маршрутов лесозаготовительной техники [25, 26], включая способность анализировать множество факторов одновременно, адаптироваться к изменяющимся

условиям в реальном времени и улучшать качество планирования по мере накопления операционного опыта. Однако данный подход имеет и существенные ограничения: потребность в обширных наборах обучающих данных, непрозрачность процесса принятия решений («эффект черного ящика»), сложности интеграции с традиционными системами управления, а также потенциальные проблемы с сертификацией и правовым регулированием [27].

Среди немногочисленных исследований по применению нейронных сетей в управлении лесной техникой можно отметить работу Sinahi Ortega и соавт. [28], хотя она фокусируется на управлении БПЛА, что существенно отличается от задач наземного транспорта. Авторы предлагают интегрированную систему, сочетающую экологическое восприятие и планирование движения. Хотя система демонстрирует способность адаптироваться к различным лесным условиям, ее существенным недостатком остается потребность в значительных объемах размеченных данных для обучения. Тем не менее данное исследование представляет значительный интерес как один из первых примеров практического применения нейросетевых технологий в лесной среде.

Компьютерное зрение и распознавание объектов. Распознавание объектов в лесной среде представляет собой сложную задачу компьютерного зрения, обусловленную высокой вариативностью текстурных характеристик, изменчивостью условий освещения и динамикой подвижных элементов. Согласно исследованию [20], современные лесные машины преимущественно используют следующие категории алгоритмов визуального анализа: SLAM-ориентированные алгоритмы, LiDAR-базированные решения [29], системы на основе искусственного интеллекта и специализированные функциональные алгоритмы.

Важно отметить, что, в отличие от стандартных реализаций, лесные беспилотные системы требуют разработки специализированных нейросетевых архитектур, способных эффективно обрабатывать зашумленные данные и обеспечивать надежное распознавание объектов даже в условиях их частичной видимости. Именно эта фундаментальная проблема продолжает оставаться ключевым ограничением в развитии концепции автономного лесного транспорта.

В работе И.В. Петухова и коллег [30] предложена технология, позволяющая автоматически выбирать деревья для выборочной рубки в режиме реального вре-

мени на основе данных дистанционного зондирования. Данная система использует лазерное сканирование древостоя для бесконтактного измерения ключевых параметров, а затем с помощью алгоритмов нечеткой логики определяет, какие деревья должны быть срублены. Такой подход позволяет производить отбор деревьев непосредственно в ходе работы лесозаготовительной машины без участия оператора, что значительно повышает эффективность выборочных рубок. Однако авторы отмечают, что применение двумерного лазерного сканера на высоте примерно 1,3 м от земли позволяет измерять диаметры и взаимное расположение стволов, но не дает информации о форме стволов и крон деревьев, что представляет серьезную проблему при некоторых видах выборочных рубок. Кроме того, даже при использовании подобных автоматизированных систем окончательное решение о спиливании деревьев остается за оператором и при этом является одним из наиболее сложных этапов всего процесса.

Также инновационной является система поддержки принятия решений RuttOpt, созданная шведскими учеными Andersson и соавт. [31]. Их подход, ориентированный на оптимизацию логистики лесовозов, может быть масштабирован до уровня отдельных форвардеров и харвестеров, работающих в условиях делянки.

Австрийские исследователи Kogler и Rauch [32] рассматривают транспортировку как часть целостной цепочки поставок, что позволяет оптимизировать не только локальные перемещения техники, но и всю логистическую схему от делянки до потребителя. Такой комплексный подход особенно ценен в условиях дефицита ресурсов, характерного для отечественного лесного хозяйства.

Кроме того, в работе La Hera с коллегами [33] описан первый в мире беспилотный лесной транспорт для полностью автономных лесозаготовительных операций. Основным преимуществом их подхода является комплексное применение компьютерного зрения, автономной навигации и алгоритмов управления манипулятором. К недостаткам можно отнести относительно низкую скорость перемещения по пересеченной местности.

Опыт внедрения беспилотных технологий в лесном хозяйстве (на примере БПЛА). Наиболее значительные достижения в области автоматизации лесного хозяйства наблюдаются в сфере применения беспилотных авиационных систем. Согласно данным

европейских исследований [20], доля БПЛА в общем парке роботизированных систем мировой лесной отрасли достигает 25%. В обзорной работе Stamatopoulos и коллег [34] детально анализируется применение беспилотных технологий для посева и мониторинга лесовосстановительных участков [35]. Авторы подчеркивают, что использование БПЛА существенно сокращает сроки лесовосстановления на труднодоступных территориях [36, 37] и обеспечивает систематический контроль за развитием молодых насаждений, что может быть органично интегрировано в комплексную систему цифрового лесного хозяйства [38].

Ключевыми преимуществами применения БПЛА для лесного мониторинга являются: высокая оперативность обследования обширных территорий, доступ к удаленным участкам, возможность получения высокодетализированных снимков [39, 40] и сравнительно низкие эксплуатационные расходы. Однако данная технология имеет существенные ограничения, включая зависимость от метеоусловий, ограниченную продолжительность полета, сложности навигации под лесным пологом и недостаточную грузоподъемность [41].

Дополнительные технологические ограничения выявлены в исследовании Liang и соавт. [42], которые отмечают невозможность сбора данных о нижних ярусах леса, погрешности в определении высоты деревьев при плотном пологе, трудности идентификации отдельных стволов в густых насаждениях и ограниченную точность оценки объемов древесины [43]. Talbot и коллеги [44] выделяют институциональные барьеры внедрения беспилотных технологий, такие как отсутствие нормативной базы для автономных систем, сопротивление традиционных операторов, высокие риски эксплуатации дорогостоящего оборудования в сложных условиях и проблемы сертификации.

Учет указанных технологических и организационных ограничений обусловил необходимость пересмотра концепции использования дронов в транспортной логистике [45] и разработки альтернативного подхода, основанного на автономных наземных транспортных системах.

Предлагаемая концепция модернизации лесозаготовительной техники заключается в интеграции комплексной системы датчиков и вычислительных модулей, обеспечивающих автономное функционирование транспортного средства. Концептуальная архитектура системы включает четыре ключевых компонента: мультимодальную

датчиковую систему, объединяющую лидарные сканеры, RGB-камеры, инерциальные измерительные блоки и GNSS-приемники для пространственной ориентации; бортовой вычислительный комплекс с программным обеспечением для обработки данных с датчиков, трехмерного моделирования местности и маршрутного планирования; нейросетевой модуль анализа данных, отвечающий за распознавание объектов и принятие решений о траектории движения; а также систему автоматизированного управления исполнительными механизмами.

Функционирование системы осуществляется по многоэтапному алгоритму. На начальном этапе, при движении под управлением оператора, происходит активное сканирование и запоминание пространственных характеристик окружающей среды [46] с фиксацией как геометрических параметров местности, так и семантических признаков объектов. Полученные данные подвергаются нейросетевой обработке, в ходе которой выделяются ключевые ориентиры, идентифицируются потенциальные препятствия и формируется карта проходимости. После загрузки материалами система по команде оператора осуществляет автономное возвращение на склад, используя созданную цифровую карту в сочетании с системой реального времени для обнаружения и обхода динамических препятствий [47]. В процессе движения происходит непрерывная оптимизация маршрута с выбором наиболее эффективной траектории с учетом текущих условий окружающей среды [48, 49].

Данный подход позволяет сохранить существующую инфраструктуру лесозаготовительных предприятий, модернизируя лишь бортовые системы техники, что существенно снижает затраты на внедрение автономных технологий по сравнению с разработкой специализированных транспортных платформ. При этом достигается значительное повышение производительности за счет автоматизации наиболее рутинных операций перемещения между складом и местом заготовки.

Результаты исследования и их обсуждение

По итогам проведенного анализа современных беспилотных технологий и опыта их применения в лесном хозяйстве можно сделать ряд обобщающих выводов [50].

С технической точки зрения наиболее существенным ограничением является обеспечение надежной навигации в специфиче-

ческих условиях лесной среды. Плотный полог древесных крон значительно снижает эффективность спутниковых систем позиционирования, в то время как сложный рельеф, динамически изменяющиеся препятствия и отсутствие четкой дорожной инфраструктуры делают традиционные методы навигации практически неприменимыми. Современные лидарные технологии и алгоритмы компьютерного зрения демонстрируют ограниченную эффективность при распознавании объектов в условиях переменной освещенности, неблагоприятных погодных явлений и высокой плотности растительного покрова.

Отдельной технической проблемой является недостаточная вычислительная мощность бортовых систем транспортных средств, не позволяющая осуществлять обработку значительных объемов данных с требуемой для реального времени скоростью.

В организационно-экономическом плане основным сдерживающим фактором выступает высокая стоимость современных датчиковых комплексов и специализированного оборудования, что существенно увеличивает капитальные затраты на внедрение автономных систем.

Кадровый дефицит проявляется в недостатке квалифицированных специалистов, обладающих компетенциями как в области лесного хозяйства, так и в сферах робототехники и искусственного интеллекта. Междисциплинарная природа разработки автономного лесного транспорта требует интеграции знаний из различных предметных областей, что создает дополнительные сложности в формировании эффективных рабочих групп.

Значительным препятствием являются также нормативно-правовые ограничения. Отсутствие специализированной законодательной базы, регламентирующей применение автономных систем в лесных массивах, создает условия правовой неопределенности.

Особую сложность представляет адаптация технологических решений к российским условиям эксплуатации. Уникальные природно-климатические характеристики российских лесных массивов требуют либо существенной модификации существующих зарубежных разработок, либо создания принципиально новых технических решений, учитывающих специфику местных условий.

На основе проведенного анализа авторами составлена таблица, в которой представлены сравнительные характеристики ключевых технологий автономизации лесозаготовительного транспорта.

Сравнительная характеристика ключевых технологий автономизации лесозаготовительного транспорта

Технология	Основные возможности	Достоинства	Недостатки	Области применения	Граничные условия
LiDAR-сканирование	Создание высокоточных 3D-моделей лесного массива для навигации и пространственного анализа	Высокая точность (погрешность ≤ 5 см); дифференциация типов растительности; оценка проходимости	Высокая стоимость оборудования; снижение эффективности при дожде/тумане/пыли; большие вычислительные затраты	Картирование лесных массивов; обнаружение препятствий; планирование маршрутов	Погодные ограничения (дождь, туман, запыленность); изменчивое окружение; высокая нагрузка на вычисления
Спутниковая навигация	Глобальное позиционирование по сигналам спутников	Широкая доступность, глобальное покрытие	Точность под пологом леса падает до 5–15 м	Определение положений техники на открытых площадках	Плотная крона леса; мультипутевые искажения сигнала
ГИС с интеграцией данных БПЛА	Оперативный обзор обширных лесных территорий; доступ к труднодоступным районам	Высокая скорость обследования больших площадей; экономичнее традиционной аэрофотосъемки	Высокая начальная стоимость; ограниченное время полета; зависимость от погодных условий; регулятивные ограничения; большой объем данных для обработки	Мониторинг лесных ресурсов; лесовосстановление; картографирование	Погодные условия; время полета аккумуляторов; нормативные ограничения; вычислительные ресурсы
SLAM-навигация	Одновременная локализация и картографирование в реальном времени; построение карт деревьев	Повышенная точность картирования и позиционирования в условиях густого леса	Сложность реализации на мобильных платформах; высокие требования к вычислительным ресурсам	Автономная навигация лесных машин	Высокая вычислительная нагрузка; сложность алгоритмов
Глубокое обучение	Автоматизированный анализ данных LiDAR и других сенсоров для распознавания объектов (например, дорог)	Высокая скорость обработки больших данных	Требуется большой объем обучающих данных; необходимость при густом подлеске и сложном рельефе	Идентификация лесных дорог и объектов; классификация местности	Объем и качество обучающих данных; адаптация к разным типам леса
Мультисенсорная интеграция	Комбинирование данных лидаров, IMU, одометрии, GNSS и др. для надежного позиционирования	Повышенная надежность локализации в условиях ограниченной видимости; устойчивость к потере отдельных сигналов	Сложная калибровка систем; повышенные вычислительные требования; значительная стоимость реализации	Навигация автономной техники в лесном бездорожье	Необходима тщательная калибровка; высокие вычислительные и финансовые ресурсы

Окончание табл.

Технология	Основные возможности	Достоинства	Недостатки	Области применения	Граничные условия
Низкоразрешающее LiDAR-сканирование	Навигация с использованием дешевых низкоразрешающих лидарных сенсоров	Более низкая стоимость системы за счет дешевых сенсоров	Снижение точности в условиях особенно густого леса	Бюджетные решения для навигации автономных систем в лесу	Ограниченная эффективность в очень плотных зарослях
Беспилотные летательные аппараты	Аэрофотосъемка, посев и мониторинг лесных насаждений; дистанционное зондирование леса	Высокая оперативность обследования; доступ к удаленным территориям; детализированные снимки; низкие эксплуатационные расходы	Зависимость от погодных условий; ограниченное время полета; сложности навигации под пологом леса; низкая грузоподъемность	Мониторинг лесных ресурсов; лесовосстановление; оценка состояния насаждений	Погодные условия; ограниченное время и дальность полета; нормативные ограничения
VR/AR-тренажеры	Иммерсивное моделирование управления лесозаготовительной техникой в виртуальной среде	Позволяют безопасно отработать навыки управления и принятия решений без риска для реальной техники	Высокая стоимость оборудования; сложность создания реалистичных сценариев; отсутствие тактильной обратной связи; возможный дискомфорт пользователей	Обучение операторов лесозаготовительных машин	Когнитивный разрыв между виртуальным и реальным; высокая стоимость оборудования
Нейросетевые алгоритмы	Оптимизация маршрутов и принятие решений в реальном времени с учетом множества параметров окружающей среды	Адаптивность к изменяющимся условиям; учет множества факторов; улучшение планирования с опытом	Требуют больших объемов размеченных данных; «черный ящик» принятия решений; сложности интеграции с существующими системами; нормативные и сертификационные барьеры	Динамическое планирование маршрутов; автономное управление машинами	Объем и качество обучающих данных; непрозрачность алгоритмов; законодательное регулирование
Компьютерное зрение	Распознавание объектов и анализ визуальных данных лесной среды	Позволяет дополнить сенсорную информацию визуальными данными для обнаружения объектов и ориентирования	Высокая вариативность условий (освещенность, текстуры); шумы и частичная видимость объектов; требует специализированных нейросетевых архитектур	Обнаружение препятствий, объектов, разметка лесных дорог; навигация	Плохая видимость; сильные шумы на изображениях; необходимость доработки алгоритмов

Источник: составлено авторами.

Заключение

Проведенная работа показала, что внедрение беспилотных технологий в лесном хозяйстве сопряжено с комплексом взаимосвязанных проблем, требующих научно-технического и организационного решения. Для преодоления выявленных барьеров необходимы междисциплинарный подход и координация усилий разработчиков, лесных предприятий и регуляторов. Тем не менее развитие датчиковых технологий, алгоритмов искусственного интеллекта и систем управления свидетельствует о высоком потенциале автономизации лесозаготовительной отрасли. Предложенная в исследовании концепция автономного лесного транспорта представляет собой один из возможных путей повышения эффективности и безопасности лесозаготовок за счет постепенной роботизации существующей техники. Практическая значимость результатов состоит в том, что выявленные ограничения и обобщенные рекомендации могут быть использованы при разработке дорожных карт цифровизации лесного комплекса. Учитывая технологические и экономические ограничения, реализация беспилотных систем должна носить поэтапный характер, сочетая экспериментальные внедрения с созданием нормативной базы и инфраструктуры, необходимой для широкого распространения автономных решений в лесном хозяйстве.

Список литературы

1. Блам Ю.Ш., Машкина Л.В. Проблемы и перспективы развития лесного хозяйства и лесозаготовительной промышленности // ЭКО. 2019. № 11 (545). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-razvitiya-lesnogo-hozyaystva-i-lesozagotovitelnoy-promyshlennosti> (дата обращения: 04.05.2025). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e23127.
2. Saleh A., Zulkifley M.A., Harun H.H. et al. Forest fire surveillance systems: A review of deep learning methods // Heliyon. 2024. Vol. 10, Is. 1. P. e23127. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023103355> (дата обращения: 15.06.2025). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e23127.
3. Ušinskis V., Nowicki M., Dzedzickis A., Bučinskas V. Sensor-Fusion Based Navigation for Autonomous Mobile Robot // Sensors. 2025. Vol. 25, Is. 4. Art. 1248. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/4/1248> (дата обращения: 06.07.2025). DOI: 10.3390/s25041248.
4. Holzinger A., Schweier J., Gollob C. et al. From Industry 5.0 to Forestry 5.0: Bridging the gap with Human-Centered Artificial Intelligence // Current Forestry Reports. 2024. Vol. 10, Is. 6. P. 442–455. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-024-00231-7> (дата обращения: 06.07.2025). DOI: 10.1007/s40725-024-00231-7.
5. Visser R., Obi O.F. Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near - Term Opportunities // Croatian Journal of Forest Engineering. 2021. Vol. 42, Is. 1. P. 13–24. URL: <https://crojfe.com/archive/volume-42-no-1/automation-and-robotics-in-forest-harvesting-operations-identifying-near-term-opportunities> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.5552/crojfe.2021.739.
6. Abdelsalam A., Happonen A. et al. Toward Autonomous Vehicles and Machinery in Mill Yards of the Forest Industry: Technologies and Proposals for Autonomous Vehicle Operations // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 88234–88250. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9861625> (дата обращения: 01.08.2025). DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3199691.
7. Chirici G., Giannetti F. et al. Robotics in Forest Inventories: SPOT's First Steps // Forests. 2023. Vol. 14, Is. 11. P. 2170. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/11/2170> (дата обращения: 06.07.2025). DOI: 10.3390/f14112170.
8. Liang X., Kankare V. et al. Terrestrial Laser Scanning in Forest Inventories // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 115. P. 63–77. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271616000204> (дата обращения: 06.08.2025). DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.
9. Ben Abdallah F., Bouali A., Meausoone P.-J. Autonomous Navigation of a Forestry Robot Equipped with a Scanning Laser // AgriEngineering. 2023. Vol. 5, Is. 1. P. 1–11. URL: <https://www.mdpi.com/2624-7402/5/1/1> (дата обращения: 01.08.2025). DOI: 10.3390/agriengineering5010001.
10. Prendes C., Acuna M., Canga E., Ordoñez C., Cabo C. Optimal bucking of stems from terrestrial laser scanning data to maximize forest value // Scandinavian Journal of Forest Research. 2023. Vol. 38, Is. 3. P. 174–188. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02827581.2023.2215544> (дата обращения: 01.08.2025). DOI: 10.1080/02827581.2023.2215544.
11. Tremblay J.F., Béland M., Gagnon R., Pomerleau F., Giguère P. Automatic three-dimensional mapping for tree diameter measurements in inventory operations // Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, Is. 8. P. 1328–1346. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21980> (дата обращения: 01.07.2025). DOI: 10.1002/rob.21980.
12. Khaldi B., Harrou F., Sun Y. Collaborative swarm robotics for sustainable environment monitoring and exploration: Emerging trends and research progress // Energy Nexus. 2025. Vol. 17. P. 100365. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000063> (дата обращения: 1.06.2025). DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100365.
13. Neuville R., Bates J.S., Jonard F. Estimating Forest structure from UAV-mounted LiDAR point cloud using machine learning // Remote Sensing. 2021. Vol. 3, Is. 3. P. 352. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/3/352> (дата обращения: 01.06.2025). DOI: 10.3390/rs13030352.
14. Kaartinen H., Hyypä J. et al. Accuracy of Kinematic Positioning Using Global Satellite Navigation Systems under Forest Canopies // Forests. 2015. Vol. 6, Is. 9. P. 3218–3236. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/6/9/3218> (дата обращения: 01.07.2025). DOI: 10.3390/f6093218.
15. Тебуева Ф.Б., Антонов В.О., Кабиняков М.Ю., Сви-стунгов Н.Ю. Алгоритм мониторинга динамической зоны распространения лесных пожаров группой беспилотных летательных аппаратов // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2023. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-monitoringa-dinamicheskoy-zony-rasprostraneniya-lesnyh-pozharov-gruppy-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 04.05.2025).
16. Li H.T., Todd Z., Bielski N. et al. 3D lidar point-cloud projection operator and transfer machine learning for effective road surface features detection and segmentation // The Visual Computer. 2022. Vol. 38, Is. 5. P. 1759–1774. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00371-021-02103-8> (дата обращения: 02.07.2025). DOI: 10.1007/s00371-021-02103-8.
17. Chen S.W., Nardari G.V. et al. SLOAM: semantic LiDAR odometry and mapping for forest inventory // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5. P. 612–619. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8949363> (дата обращения: 02.07.2025). DOI: 10.1109/LRA.2019.2963823.
18. Cheng L., Chen S. et al. Registration of laser scanning point clouds: a review // Sensors. 2018. Vol. 18, Is. 5. P. 1641. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/5/1641> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.3390/s18051641.

19. Shan T., Englot B. LeGO-LOAM: lightweight and ground-optimized LiDAR odometry and mapping on variable terrain // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018. P. 4758–4765. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8594299> (дата обращения: 04.07.2025). DOI: 10.1109/IROS.2018.8594299.
20. Oliveira L.F.P., Moreira A.P., Silva M.F. Advances in forest robotics: a state-of-the-art survey // Robotics. 2021. Vol. 10, Is. 2. P. 53. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/10/2/53> (дата обращения: 04.07.2025). DOI: 10.3390/robotics10020053.
21. Ringdahl O., Lindroos O. et al. Path tracking in forest terrain by an autonomous forwarder // Scandinavian Journal of Forest Research. 2017. Vol. 26. P. 350–359. URL: https://www.researchgate.net/publication/233094719_Path_tracking_in_forest_terrain_by_an_autonomous_forwarder (дата обращения: 04.07.2025). DOI: 10.1080/02827581.2011.566889.
22. Zhang C., Yong L., Chen Y. et al. A rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope // Sensors. 2019. Vol. 19, Is. 9. P. 2136. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2136> (дата обращения: 05.07.2025). DOI: 10.3390/s19092136.
23. Gupta H., Andreasson H. Robust scan registration for navigation in forest environment using low-resolution LiDAR sensors // Sensors. 2023. Vol. 23, Is. 10. P. 4736. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4736> (дата обращения: 05.07.2025). DOI: 10.3390/s23104736.
24. Petukhov I., Steshina L., Glazyrin A. Application of virtual reality technologies in training of man-machine system operators // Proceedings of the 2017 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). 2017. P. 1–7. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8188569> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.1109/ICISCT.2017.8188569.
25. La Hera P.M., Mendoza Trejo O., Lindroos O. et al. Exploring the Feasibility of Autonomous Forestry Operations: Results from the First Experimental Unmanned Machine // Preprint. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.authorea.com/users/621881/articles/645238-exploring-the-feasibility-of-autonomous-forestry-operations-results-from-the-first-experimental-unmanned-machine> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.22541/au.168492982.27477779/v1.
26. Zhao X., Wang Z., Huang C. et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect // Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 227. P. 120254. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741742300756X> (дата обращения: 10.07.2025). DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120254.
27. Арифджанова Н.З. Применение искусственного интеллекта для оптимизации маршрутов транспорта // Universum: технические науки. 2023. № 5 (110). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15404> (дата обращения: 04.05.2025).
28. Cui X., Wang Y., Yang S., Liu H., Mou C. UAV Path Planning Method for Data Collection of Fixed-Point Equipment in Complex Forest Environment // Frontiers in Neurorobotics. 2022. Vol. 16. P. 1105177. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2022.1105177/full> (дата обращения: 10.05.2025). DOI: 10.3389/fnbot.2022.1105177.
29. Tang J., Chen Y., Kukko A. et al. SLAM-Aided Stem Mapping for Forest Inventory with Small-Footprint Mobile LiDAR // Forests. 2015. Vol. 6, Is. 12. P. 4588–4606. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/6/12/4390> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.3390/f6124390.
30. Petukhov I., Steshina L., Tanryverdiev I. Remote Sensing of Forest Stand Parameters Automated Selection of Trees in Real-Time Mode in the Process of Selective Cutting // Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing, Autonomic and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications. 2014. P. 390–395. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7306980> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom.2014.113.
31. Andersson G., Flisberg P., Lidén B., Rönqvist M. RutOpt – a decision support system for routing of logging trucks // Canadian Journal of Forest Research. 2008. Vol. 38, Is. 7. P. 1784–1796. URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/X08-017> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1139/X08-017.
32. Kogler C., Rauch P. Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain // Research in Transportation Business & Management. 2023. Vol. 47. P. 100946. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210539523000020> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1016/j.rtbm.2023.100946.
33. La Hera P., Morales D., Westerberg S. et al. Exploring the feasibility of autonomous forestry operations: results from the first experimental unmanned machine // Journal of Field Robotics. 2024. Vol. 41, Is. 4. P. 942–965. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.22300> (дата обращения: 11.05.2025). DOI: 10.1002/rob.22300.
34. Stamatopoulos I., Le T.C., Daver F. UAV-assisted seedling and monitoring of reforestation sites: a review // Australian Forestry. 2024. Vol. 87, Is. 2. P. 90–98. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00049158.2024.2343516> (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.1080/00049158.2024.2343516.
35. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-kvadrokoptera-dlya-monitoringa-vozobnovleniya-lesa> (дата обращения: 04.05.2025).
36. Buchelt A., Adrowitzer A., Kieseberg P. et al. Exploring Artificial Intelligence for Applications of Drones in Forest Ecology and Management // Forest Ecology and Management. 2024. Vol. 551. P. 121530. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723007648> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121530.
37. Castro Gutiérrez J., Alcaraz-Segura D. et al. Automated precise seeding with drones and artificial intelligence: a workflow // Restoration Ecology. 2024. Vol. 32, Is. 5. P. 14164. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/rec.14164> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.1111/rec.14164.
38. Sun H., Yan H., Hassanalani M., Zhang J., Abdelkefi A. UAV platforms for data acquisition and intervention practices in forestry: towards more intelligent applications // Aerospace. 2023. Vol. 10, Is. 3. P. 317. URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/317> (дата обращения: 18.05.2025). DOI: 10.3390/aerospace10030317.
39. Jarahizadeh S., Salehi B. Advancing tree detection in forest environments: a deep learning object detector approach with UAV LiDAR data // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 105. P. 128695. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866725000299> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128695.
40. Sandino J., Pegg G., Gonzalez F., Smith G. Aerial mapping of forests affected by pathogens using UAVs, hyperspectral sensors, and artificial intelligence // Sensors. 2018. Vol. 18, Is. 4. P. 944. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/944> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.3390/s18040944.
41. Aliane N. Drones and AI-Driven Solutions for Wildlife Monitoring // Drones. 2025. Vol. 9, Is. 7. P. 455. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/7/455> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.3390/drones9070455.
42. Liang X., Wang Y., Pyörälä J. et al. Forest in situ observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements // Forest Ecosystems. 2019. Vol. 6. P. 1–16. URL: <https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-019-0173-3> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.1186/s40663-019-0173-3.
43. Wang D., Wan B., Liu J. et al. Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in China using an upscaling method from field plots, UAV-LiDAR data and Sentinel-2 imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. Vol. 85. P. 101986. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>

pii/S0303243419306440 (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.1016/j.jag.2019.101986.

44. Talbot B., Pierzchała M., Astrup R. Applications of remote and proximal sensing for improved precision in forest operations // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 38, Is. 2. P. 327–336. URL: <https://zenodo.org/records/890539> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.5281/zenodo.890539.

45. Fujimoto A., Haga C., Matsui T. et al. An end-to-end process development for UAV-SfM based forest monitoring: individual tree detection, species classification and carbon dynamics simulation // *Forests*. 2019. Vol. 10, Is. 8. P. 680. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/8/680> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.3390/f10080680.

46. Pierzchała M., Giguère P., Astrup R. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 145. P. 217–225. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917301631> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.1016/j.compag.2017.12.034.

47. Nevalainen P., Li Q. et al. Navigation and mapping in forest environment using sparse point clouds // *Remote Sens-*

ing. 2020. Vol. 12, Is. 24. P. 4088. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4088> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.3390/rs12244088.

48. Ferreira J.F., Portugal D., Andrada M.E., Machado P., Rocha R.P., Peixoto P.S. Sensing and Artificial Perception for Robots in Precision Forestry: A Survey // *Robotics*. 2023. Vol. 12, Is. 5. P. 139. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/12/5/139> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.3390/robotics12050139.

49. Giusti A., Guzzi J., Cireşan D.C. et al. A Machine Learning Approach to Visual Perception of Forest Trails for Mobile Robots // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. Vol. 1. P. 661–667. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7358076> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.1109/LRA.2015.2509024.

50. Jiang S., Wang S., Yi Z. et al. Autonomous navigation system of mobile robot based on 3D LiDAR and 2D LiDAR SLAM // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 815218–815232. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.815218/full> (дата обращения: 25.05.2025). DOI: 10.3389/fpls.2022.815218.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00568 «Методы и интеллектуальная система поддержки динамической устойчивости операторов эргатических систем», <https://rscf.ru/project/23-19-00568/>.

Financing: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-19-00568 “Methods and intelligent system for supporting the dynamic stability of operators of ergatic systems”, <https://rscf.ru/project/23-19-00568/>.