

РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ НАЗЕМНОЙ ЛЕСНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ. ОБЗОР

В.Г. Дыгало✉, Г.О. Котиев, Л.В. Дыгало, Г.А. Бычков

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

dygalovg@bmstu.ru

Исследованы разработки роботизированных систем для работы в сложных условиях лесной среды. Уделено внимание специфическим характеристикам леса, таким как переменные температуры, влажности и сложный рельеф, создающие трудности для эффективного функционирования роботов. Рассмотрены проблемы: отсутствие сетевой инфраструктуры для связи, сложные условия почвы и уязвимость систем перед стихийными бедствиями. Выявлена необходимость специализированных решений, адаптированных к условиям леса, в том числе использование надежных систем передвижения по неровной поверхности, мощных источников энергии для длительной работы и современных технологий связи, позволяющих поддерживать связь в условиях ограниченной видимости. Проанализированы различные направления применения робототехнических систем в лесном хозяйстве от мониторинга состояния окружающей среды и тушения лесных пожаров до проведения инвентаризационных операций и выполнения задач по посадке и заготовке леса. Приведены примеры существующих решений, таких как роботы-амфибии и специализированные машины для тушения пожаров, подчеркивающие потенциал технологий в исключении человеческого фактора и повышении безопасности в лесном хозяйстве. Несмотря на существующие сложности, потенциальные выгоды от применения роботизированных систем в лесах значительны. Они могут не только улучшить управление лесными ресурсами, но и способствовать охране окружающей среды, снижая негативное воздействие на экосистемы.

Ключевые слова: колесный, гусеничный, робот, лесные робототехнические системы, концепция «Лес 4.0»

Ссылка для цитирования: Дыгало В.Г., Котиев Г.О., Дыгало Л.В., Бычков Г.А. Разработки в области наземной лесной робототехники. Обзор // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 84–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-84-95

Лесная среда — это часть повседневной жизни многих людей во всем мире. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), леса занимают около 4,06 млрд га, что эквивалентно 31 % площади суши земного шара. Глобальный процесс урбанизации трансформирует средства производства и труда не только работников лесного хозяйства, биологов и экологов.

Актуальной проблемой, является отсутствие контроля, мониторинга и сохранения лесных регионов. Для преодоления проблем и улучшения выполнения различных задач в области лесного хозяйства в мире разрабатывается концепция «Лес 4.0».

Основная цель концепции «Лес 4.0» — создание программно-аппаратных комплексов, позволяющих легко накапливать и стандартизировать данные, полученные из различных

источников, с помощью технологии и методов Big Data, машинного обучения, искусственного интеллекта и пр.

Концепция «Лес 4.0» аналогична концепции «Умный город». Она предполагает использование роботизированных систем и электронных устройств при решении задач лесного хозяйства, в частности мониторинга окружающей среды, предотвращения пожаров, инвентаризации, посадки, обрезки и заготовки.

Одним из ключевых преимуществ концепции «Лес 4.0» является автоматизация и улучшение эффективности процессов лесного хозяйства. Роботизированные системы позволяют проводить мониторинг окружающей среды в режиме реального времени, детектировать и предотвращать пожары, а также оптимизировать процессы посадки, обрезки и заготовки деревьев.

Использование технологий Big Data, машинного обучения и искусственного интеллекта дает возможность собирать, анализировать и

стандартизировать крупные объемы данных о состоянии лесных регионов. Это помогает улучшить планирование и оптимизировать принятие решений в области лесного хозяйства, облегчает прогнозирование возможных проблем и их последствия.

Кроме того, концепция «Лес 4.0» способствует повышению эффективности использования ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. С ее помощью можно рационально использовать средства на обработку, транспортировку и заготовку древесины, минимизировать негативные последствия лесозаготовительных работ для биоразнообразия и экосистем.

Внедрение концепции «Лес 4.0» обеспечивает инновационное развитие лесной отрасли. Новые технологии и методы способствуют созданию новых рабочих мест, привлечению инвестиций и повышению конкурентоспособности отечественного лесного сектора в мировом масштабе.

Таким образом, концепция «Лес 4.0» имеет огромный потенциал для улучшения управления и использования лесных ресурсов, решения существующих проблем в области лесного хозяйства, обуславливая эффективное сохранение и потребление лесных ресурсов в интересах будущих поколений.

Цель работы

Цель работы — аргументация применения концепции «Лес 4.0» и технологий Big Data, машинного обучения и искусственного интеллекта в лесном хозяйстве на основании обзора разработок в области наземных лесных робототехнических систем.

Результаты и обсуждение

Лесная среда в отличие от аграрной характеризуется колебаниями температуры и влажности воздуха, крутизной склонов, наличием водных объектов и т. п. Это затрудняет создание надежных образцов робототехники, которые бы эффективно функционировали в таких условиях.

Кроме того, в лесной среде отсутствует сетевая инфраструктура связи. Древесная растительность препятствует распространению удаленной связи роботов с системами мониторинга и управления, что ограничивает возможности удаленного контроля и усложняет процедуру связи.

Важную преграду для работы лесных роботов составляют лесные почвы. Они имеют неоднородную структуру и содержат много мелких камней, веток и др. Это может вызвать скольжение робота и создать сложности для его передвижения. Для того чтобы решить данную проблему, следует использовать специальные механизмы передвижения, способные справиться с неровностями и препятствиями по пути.

Дополнительной трудностью при разработке лесных роботов является их уязвимость перед стихийными бедствиями, в частности ураганами. В отличие от сельскохозяйственных роботов, которые могут найти укрытие в случае неблагоприятных погодных условий, лесные роботы должны оставаться в рабочем состоянии даже после возникновения бури. Для этого их оснащают специальными системами связи и передвижения, обеспечивающими их работоспособность и в условиях непогоды.

Несмотря на все трудности, разработка роботов для работ в лесной среде имеет большой потенциал. Роботов можно использовать для мониторинга окружающей среды, управления лесными ресурсами, и для выполнения охраны и эксплуатации лесов. Успешную реализацию таких роботов могут обеспечить учет особенностей лесной среды и разработка специализированных объектов, предназначенных для преодоления имеющихся сложностей. Важно учитывать такие особенности лесной среды, как колебания температуры и влажности воздуха, наличие разнообразных препятствий и возможное развитие неблагоприятных погодных условий, в частности сильный ветер, ливни и др. Роботы должны автономно работать достаточно длительный период времени. Для этого их следует оснастить мощными и надежными батареями либо другими источниками энергии и обеспечить эффективными системами управления энергопотреблением.

Кроме того, лесные роботы должны иметь специализированные системы передвижения, которые позволят им эффективно перемещаться по неровной и непредсказуемой поверхности, преодолевать такие препятствия, как камни, корни деревьев и низкорослая растительность, а также крутые склоны и даже скалы.

Для обеспечения надежной связи с удаленными системами мониторинга и управления роботы необходимо оборудовать специальными системами связи, которые могут работать в условиях ограниченной видимости и сильной помехоустойчивости, например специальными антеннами, сетями ретрансляции сигналов и другими технологиями.



Рис. 1. Робот-амфибия — Chico Mendes
Fig. 1. Amphibious robot — Chico Mendes

Важно учитывать, что лесная среда наряду с перечисленным выше может быть опасной для роботов из-за наличия диких животных, вредителей и других потенциальных угроз, поэтому роботы должны иметь системы безопасности, благодаря которым смогут избежать опасных ситуаций и защитить себя в случае необходимости.

Для разработки роботов, приспособленных к таким условиям, важно учитывать весь комплекс сложностей. Прежде всего, у них должны быть специальные колеса или гусеницы, которые смогут преодолевать неровности рельефа и разнообразные препятствия как на лесных тропинках, так и по бездорожью. Положительно оценивается использование датчиков и камер для обнаружения и преодоления препятствий, систем навигации, обеспечивающих эффективное перемещение по лесу.

Надежную связь с удаленными системами мониторинга и управления могут гарантировать специальные антенны, например направленные или антенны с высокой усилительной способностью. Кроме того, имеют значение технологии ретрансляции сигналов или беспроводные сети между роботами в целях наличия непрерывной связи между ними.

Для обеспечения безопасности роботов в лесной среде следует использовать датчики движения или тепловые датчики в целях обнаружения диких животных, других потенциальных угроз, а также системы аварийной остановки или защиты, чтобы предотвратить повреждение или потерю робота в случае опасности.

В целом разработка роботов для их применения в лесной среде должна строиться на

современных технологиях и инновациях для повышения их эффективности и надежности при выполнении задач в сложных условиях лесного окружения.

В настоящее время все большую популярность приобретает применение роботов при управлении лесными ресурсами. Рассмотрим подробнее лесохозяйственные направления, нуждающиеся в расширении применения робототехники.

Охрана окружающей среды и мониторинг составляют важный аспект управления лесным хозяйством. С помощью роботов решаются задачи по мониторингу лесов, контролю уровня загрязнения воздуха и водных объектов, обнаружению и предотвращению незаконных рубок деревьев. Благодаря точности и надежности роботы способны эффективно выполнять свою работу, что позволяет сохранить природу и биоразнообразие лесных экосистем.

Тушение лесных пожаров является неотъемлемой частью лесного хозяйства. Пожары представляют собой опасную угрозу лесным ресурсам. Задействование роботов при тушении пожаров ускоряет этот процесс, поскольку они оснащены датчиками и системами искусственного интеллекта, позволяющими им быстро обнаруживать возгорания и быстро реагировать на них. Роботы могут подавать сигналы тревоги, ограничивать распространение огня, снижая риск для людей, выполняющих эту опасную работу.

Инвентаризационные операции составляют неотъемлемую часть лесного хозяйства. Роботы могут с легкостью их выполнять, сканируя лесные участки и собирая информацию о состоянии деревьев, их размерах и возрасте. Благодаря использованию роботов, процесс инвентаризации становится более точным и эффективным, что позволяет улучшить планирование и принятие решений в лесном хозяйстве.

Посадка, обрезка и заготовка леса должны осуществляться с помощью роботов, поскольку они способны выполнять эти задачи с высокими точностью и скоростью, что значительно повышает производительность и сокращает затраты на рабочую силу.

Рассмотрим некоторые робототехнические системы, применяющиеся в лесном хозяйстве.

Пример робототехники для охраны и мониторинга окружающей среды в лесу — Chico Mendes — робот-амфибия с колесными ногами и активной реконфигурацией, способен ходить по газопроводам, земле, воде, болотам и песку (рис. 1) [1]. Робот оснащен роботизированной рукой с датчиками качества воды и газа, красной, зеленой и синей (RGB) камерами и



Рис. 2. Роботизированная платформа с БПЛА — THeMIS Observe KX-4 LE (Long Endurance)

Fig. 2. Robotic platform with UAV — THeMIS Observe KX-4 LE (Long Endurance)

поддержкой отбора проб, расположенной на конечном приводе, для мониторинга возможных утечек газа и загрязнения вод. Экологический гибридный робот (EHR) Chico Mendes предназначен для работы во внутренних районах бассейна р. Амазонки и представляет собой дистанционно управляемое транспортное средство, разработанное для выполнения миссий по мониторингу для бразильской нефтяной компании Petrobras S.A. между столицей штата Амазонас городом Манаус и муниципалитетом Коари на расстоянии около 400 км газопровода вдоль леса.

Есть примеры применения в лесном хозяйстве шагающих роботов, которые используются для проведения мероприятий по мониторингу окружающей среды. Этот тип робототехнической системы передвижения отличается быстрой адаптацией к склону местности, распространен по причине неструктурированности и труднодоступности лесной среды.

Для мониторинга широко применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). В настоящее время появляются технологии применения спарок, когда БПЛА размещаются на наземных мобильных шасси для расширения функциональных возможностей и увеличения дальности работы робототехнической системы (рис. 2).

В отличие от мониторинга, тушение лесных пожаров требует прямого вмешательства (традиционно с помощью пожарных машин и самолетов) в лесную среду в целях минимизации наносимого пожаром ущерба не только фауне и флоре, но и популяциям, проживающим в ней. Роботизированные приложения ускоряют тушение лесных пожаров, могут обеспечить безопасность и эффективно распылять воду или замедлители.

К конструкции пожарных роботов предъявляется комплекс требований, предусматрива-



Рис. 3. Пожарный робот Lockheed Martin

Fig. 3. Lockheed Martin firefighting robot

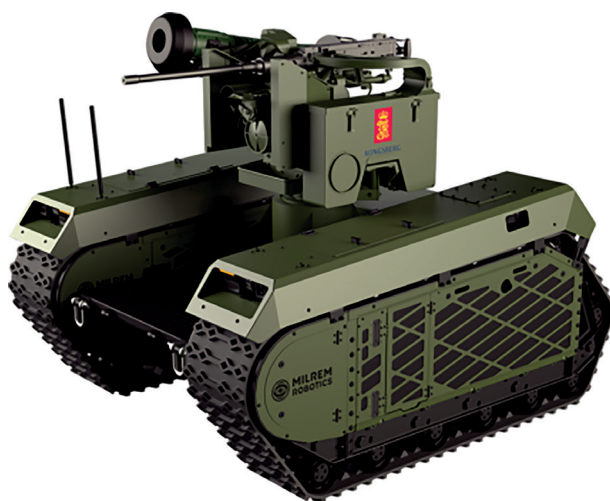


Рис. 4. Роботизированная платформа военного назначения — THeMIS Combat Milrem Robotics

Fig. 4. Military robotic platform — THeMIS Combat Milrem Robotics

ющих наличие у них устойчивости к высоким температурам и концентрациям газов и пыли в воздухе, высокой грузоподъемности и системы передвижения, предназначенной для транспортировки большого объема грузов по пересеченной местности.

В области инвентаризации лесных ресурсов также используются робототехнические системы. Например, автономный робот Forest Inventory and Analysis (FIA), разработанный Орегонским университетом, собирает данные о деревьях, их высоте, диаметре стволов и общем состоянии, что помогает управляющим принимать решения.



Рис. 5. Роботизированная платформа для тушения пожаров — Multiscope Rescue with Hydra

Fig. 5. Robotic platform for firefighting — Multiscope Rescue with Hydra



Рис. 7. Роботизированная платформа для тушения остатков очагов пожара — Multiscope Rescue Post-fire

Fig. 7. Robotic platform for extinguishing fire residues — Multiscope Rescue Post-fire



Рис. 6. Роботизированная платформа с дополнительными шлангами для тушения пожаров — Multiscope Rescue Hose Cartridge

Fig. 6. Robotic platform with additional hoses for firefighting — Multiscope Rescue Hose Cartridge

Для посадки, обрезки и заготовки леса разработаны отдельные робототехнические системы, например робот Planterbot. Он сконструирован учеными Швеции. Робот автоматически осуществляет посадку саженцев непосредственно в землю, оснащен датчиками и камерами, определяющими оптимальное место для посадки и обеспечивающими правильное ориентирование в лесной среде.

Концепция «Лес 4.0» открывает новые возможности для применения робототехнических систем в лесном хозяйстве. Она позволяет создать инновационные технологии и разработать методы, основанные на современных достиже-

ниях в области информационных технологий, машинного обучения и искусственного интеллекта, улучшает управление и обеспечивает охрану лесных ресурсов.

Конструктивно в данной сфере применения использовались гусеничные машины, но появились примеры и колесных роботов — (6WD), разработанных производителем военной продукции Lockheed Martin [2] (рис. 3), который адаптирован для выполнения операций по тушению пожаров. Этим роботом можно управлять с помощью пульта дистанционного управления, RGB и инфракрасных камер.

Довольно широка практика адаптации военных роботов для лесного сектора. Например, в работе [3] представлено несколько версий роботов не только для пожаротушения, но и для содействия в транспортировке шлангов в труднодоступных средах. При этом система передвижения и управления стандартизована, изменяется только модульное навесное оборудование (рис. 4).

Платформа Multiscope оснащена модульным генератором пены и/или воды с расходом 3000 л/мин. (рис. 5). Платформа Multiscope Rescue with Hydra используется при тушении пожаров. За ним проводят четыре линии водяных шлангов под давлением в целях обеспечения достаточного количества воды и/или пены для тушения. Для этого используется Multiscope Rescue Hose Cartridge (рис. 6).

Одной из сложных и трудоемких задач является прокладка пожарных шлангов для доставки воды, которые недоступны для основных

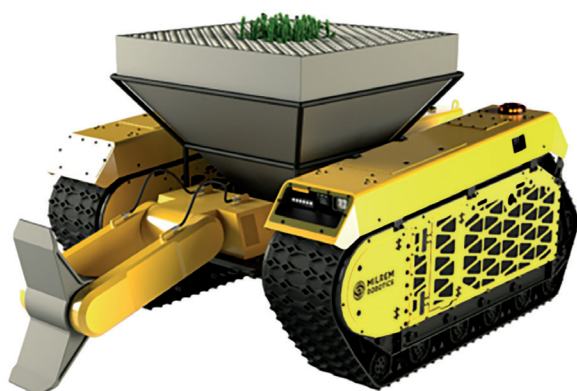


Рис. 8. Сеялка Multiscope Forester Planter
Fig. 8. Multiscope Forester Planter



Рис. 9. Кусторез Multiscope Forester Brushcutter
Fig. 9. Multiscope Forester Brushcutter

пожарных машин или слишком опасны для пожарных. Роботизированная платформа с дополнительными шлангами для тушения пожаров Multiscope Rescue Hose Cartridge добирается до проблемной зоны значительно быстрее, чем пожарная команда, что обеспечивает быстрое начало процесса тушения.

Беспилотная система используется для послепожарного тушения ландшафтных или лесных пожаров. Система оснащена модульным баком для воды или пенотушения и роботизированной рукой. Кроме того, она оснащена тепловизионными камерами, дающими возможность находить горячие точки (непогашенные участки), которые можно потушить прямо на месте (рис. 7).

Для разработки технологий, положительно влияющих на окружающую среду, разрабатываются «плантаторы» деревьев. Они имеют систему, которая прокалывает землю, укладывает саженец с помощью системы сжатого воздуха и, наконец, закрывает отверстие, утрамбовывая в автоматическом режиме почву вокруг саженца.

Сеялка Multiscope Forester (Multiscope Forester Planter) является коммерческим роботом-сеялкой с полезной нагрузкой вместимостью 380 саженцев (рис. 8). Благодаря модульной конструкции имеет две системы управления: телеуправление и навигацию по путевым точкам. Построенный на той же системе передвижения, что и сеялка Multiscope Forester, кусторез Multiscope Forester (Multiscope Forester Brushcutter) имеет щеточный режущий и гидравлический силовой инструменты (рис. 9). Благодаря модульной структуре роботов задачи могут выполняться во время лесохозяйственных работ.

Сеялка Multiscope Forester оснащена модульным контейнером с полезной нагрузкой



Рис. 10. Беспилотное наземное транспортное средство UGV
Fig. 10. Unmanned Ground Vehicle UGV

вместимостью 380 саженцев. Скорость посадки составляет около 5...6,5 ч на 1 га, в зависимости от вида саженца и рельефа местности.

Роботизированный кусторез Forester включает в себя платформу Multiscope, оснащенную гидравлическим силовым агрегатом (максимальное давление 250 Па; расход масла 70 л/мин), щеточно-режущим инструментом ($d < 10$ см) и необходимыми датчиками.

Таким образом, модульные решения широко применяются в разных сферах экономической деятельности человека.

Беспилотное наземное транспортное средство (UGV) — это роботизированное транспортное средство, позволяющее исследователям продолжать тестировать и отлаживать свою сенсорную систему для достижения

двух целей проекта автоматизированной заготовки: автономной навигации и инвентаризации лесов в режиме реального времени (рис. 10). Что касается последнего, то транспортное средство UGV в конечном итоге будет отправлено в лес в разведывательных целях для передачи данных о породах деревьев, объеме древесины и другой информации о лесной инвентаризации прежде чем отправлять более крупные машины. В качестве примера можно привести разработку Clearpath Robotics [4].

Для анализа лесной биомассы используется сочетание различных технологий. Для картирования стволов при инвентаризации лесов широко применяются технологии LiDAR.

Навигация ведется с помощью Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) с использованием различных сочетаний алгоритмов. При этом исследователи получают иногда противоположные результаты, поскольку на точность влияет огромное количество факторов, в частности различная густота леса может привести к искажению точности.

Субарктические и арктические условия накладывают свою специфику. В среде со снегом и льдом вследствие большого момента инерции даже после завершения маневра робот может продолжать движение. Угловое смещение является основной характеристикой, которая мешает системам одометрии и позиционирования. Таким образом, при выполнении инвентаризационных операций в средах со льдом и снегом необходимо оценить кинематическую модель, которая наилучшим образом адаптируется к выбранному типу местности.

Выводы

В рамках исследований, связанных с разработкой робототехнических систем для лесного хозяйства, можно сделать следующие выводы:

- в лесной отрасли более 30 % роботов используют гусеничный движитель, примерно 25 % — БПЛА, 22 % — 4WD, 11 % — шагающие, по 3 % — 6WD и перемещающиеся по проводам между деревьев;

- около 10 % роботов оснащены многофункциональной рукой-манипулятором;

- для посадки, обрезки и заготовки используются около 20 % роботов; для охраны окружающей среды и мониторинга лесов — около 25 % роботов; инвентаризационные операции составляют примерно 35 %, а для тушения пожаров — 20 %;

- 80 % роботов находятся на стадии исследований, а 20 % являются коммерческими решениями.

Для повышения точности и эффективности роботизированных приложений в лесу необходимо улучшить две основные области: «интеллектуальный» лес на основе современных технологий и навигационные системы.

Разработка робототехнических комплексов для работы в лесной среде имеет большое значение для государственного сектора, поскольку способствует сохранению фауны и флоры, а также для частного сектора, предоставляя возможность получения дохода. Роботизированные системы выполняют важные функции, такие как мониторинг состояния лесного покрова, обнаружение и предотвращение лесных пожаров, проведение инвентаризации лесных ресурсов, посадка и обрезка деревьев, а также заготовка древесины.

Современные технологии позволяют создать «интеллектуальный» лес, основанный на сборе и анализе данных с датчиков, установленных в различных участках леса. Такая система может контролировать влажность почвы, уровень загрязнения воздуха, показатели роста деревьев, наличие вредителей и другие параметры, что позволяет персонализировать уход за лесом и оперативно реагировать на изменения в окружающей среде.

Важной составляющей улучшения роботизированных приложений для работы в лесу являются навигационные системы, обеспечивающие точное определение местоположения робота в лесной среде. Точная навигация позволяет роботам эффективно перемещаться между деревьями и выполнять поставленные задачи без преград. Разработка навигационных систем на основе современных технологий может способствовать повышению точности и надежности работы робототехнических комплексов в лесной среде.

Таким образом, развитие «интеллектуального» леса и улучшение навигационных систем способствуют повышению эффективности работы робототехнических комплексов в лесной среде. Это позволяет сохранять окружающую среду, обеспечивать безопасность в лесных районах и повышать производительность в сфере лесного хозяйства.

Список литературы

- [1] O robô ambiental híbrido «Chico Mendes» da Petrobrás // Diário do Pré-Sal. URL: <https://diariodopresal.wordpress.com/2011/05/04/o-robo-ambiental-hibrido-chico-mendes-da-petrobras/> (дата обращения 15.05.2023).

- [2] Posts tagged 'Lockheed Martin SMSS' // UNMANNED SYSTEMS: Notes from AUVSI's 2014 Conference and Trade Show. URL: <https://4gwar.wordpress.com/tag/lockheed-martin-smss/> (дата обращения 15.05.2023).
- [3] Enhancing combat effectiveness through advanced robotics. URL: <https://milremrobotics.com/> (дата обращения 15.05.2023).
- [4] Boldly go where no robot has gone before. URL: <https://clearpathrobotics.com/> (дата обращения 15.05.2023).
- [5] Мобильные роботы, их типы, возможности и применение. URL: <https://top3dshop.ru/blog/mobile-robots-types-and-applications.html> (дата обращения 15.05.2023).
- [6] Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // Proceedings of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 21–26, 2001 Coex Seoul, Korea: IEEE, 2001, pp. 2590–2595.
- [7] Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching // J. of Intelligent & Robotic Systems, 2013, v. 71 (1), pp. 85–108.
- [8] Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry for ground vehicle applications // J. of Field Robotics, 2006, v. 23 (1), pp. 3–20.
- [9] Семенков А.П. Система управления приводами мобильного робота // Студенческая научная весна. Сб. тезисов докл. Всерос. студенческой конф., посвященной 170-летию В.Г. Шухова, Москва, 01–30 апреля 2023 года. М.: Научная библиотека, 2023. С. 433–434.
- [10] Дыгало В.Г., Семенков А.П. Концепция системы управления малой гусеничной машиной // Ежегодная национальная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2020 г.: сб. тезисов докл. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2021. С. 101–102.
- [11] Дыгало В.Г., Порватов М.Н. Концепция реализации модулей малой гусеничной машины для отработки и адаптации алгоритма управления движением // Ежегодная нац. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам науч.-исслед. работ за 2020 г., Мытищи, 1–3 февраля 2021 г. Сб. тезисов докл. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2021. С. 85–87.
- [12] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д. Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины // Лесотехнический журнал, 2014. Т. 4. № 4 (16). С. 179–190.
- [13] Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Беляков В.В. Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода // Тр. НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2013. № 2 (99). С. 155–160.
- [14] Jennings N., Paratin P., Jonson M. Using Intelligent Agents to Manage Business Processes // The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First Int. Conf. London (UK), 1996, pp. 345–376.
- [15] Can We Make Our Robots Less Biased Than We Are? URL: <https://www.nytimes.com/2020/11/22/science/artificial-intelligence-robots-racism-police.html?searchResultPosition=3> (дата обращения 15.05.2023).
- [16] Wong J.Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations // J. of Terramechanics, 2009, 46(4), pp. 141–155.
- [17] Оплетаев А.С., Жигулин Е.В., Залесов С.В. Опыт многоротационного выращивания контейнерного посадочного материала для искусственного лесовосстановления в теплицах с регулируемым микроклиматом // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 2. С. 152–157.
- [18] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в зарубежных странах // Астраханский вестник экологического образования, 2022. № 4 (70). С. 179–189.
- [19] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Пилипенко В.Н., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации // Астраханский вестник экологического образования, 2022. № 5 (70). С. 203–211. DOI 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [20] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanners and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project // Korean J. Agric. Sci., 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [21] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanners' performance for potted seedlings // Turkish J. Agric. For., 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [22] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation // Current Science. Indian Academy of Sciences, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [23] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration // Croat. J. For. Eng., 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722
- [24] Бартнев И.И., Гаврин Д.С. Конструктивные особенности посадочных машин // Лесотехнический журнал, 2019. Т. 9. № 2. С. 147–155. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/16
- [25] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter // Agron., 2020, v. 10, pp. 1938.
- [26] Markumningsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link // Agriculture. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [27] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung S.-O. Analysis of

- Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards // *Agriculture*. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [28] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings // *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [29] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [30] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission // *Chinese J. Mech. Eng.* Springer Singapore, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [31] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine // *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier Ltd, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [32] Reza M.N., Islam M.N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.J., Choi I.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter // *Machines*. MDPI, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [33] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter // *J. Mech. Sci. Technol. Korean Society of Mechanical Engineers*, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [34] Iqbal M.Z., Islam M.N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y.J., Chung S.O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter // *Machines*, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006
- [35] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM // *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600
- [36] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter // *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [37] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System // *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [38] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force // *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [39] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs // *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

Сведения об авторах

Дыгало Владислав Геннадиевич [✉] — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал), dugalovg@bmstu.ru

Котиев Георгий Олегович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал)

Дыгало Людмила Викторовна — инженер, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал)

Бычков Георгий Александрович — ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал)

Поступила в редакцию 18.03.2024.

Одобрено после рецензирования 08.10.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

DEVELOPMENTS OF GROUND FOREST ROBOTICS. REVIEW

V.G. Dygalo✉, G.O. Kotiev, L.V. Dygalo, G.A. Bychkov

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

dygalovg@bmstu.ru

A topical issue nowadays is the lack of control, monitoring and conservation of forest regions. To solve the issues and improve the implementation of various tasks in the field of forestry in the world, the concept of «Forest 4.0» is being developed. This concept includes the widespread use of robotic systems in the forestry industry. This article is devoted to an overview of developments in the field of ground-based forestry robotic systems. Attention is paid to robotic solutions with wheeled and tracked types of propulsion. Walking, wire-walking and unmanned aerial vehicles (UAV) are outside the scope of this article. Examples of solutions for environmental protection and monitoring, forest fire fighting, inventory operations and planting, pruning and logging are considered. As a result, it can be noted that in order to improve the accuracy and execution time of several forest robotic applications for environmental conservation, monitoring, forest fire fighting, inventory, planting, pruning and harvesting, two main areas need improvement: IoT-based smart forest and navigation systems.

Keywords: wheeled, tracked, robot, forest robotic systems, Forest 4.0

Suggested citation: Dygalo V.G., Kotiev G.O., Dygalo L.V., Bychkov G.A. *Razrabotki v oblasti nazemnoy lesnoy robototekhniki. Obzor* [Developments of ground forest robotics. Review]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 84–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-84-95


References

- [1] O robô ambiental híbrido «Chico Mendes» da Petrobrás. Diário do Pré-Sal. Available at: <https://diariodopresal.wordpress.com/2011/05/04/o-robo-ambiental-hibrido-chico-mendes-da-petrobras/> (accessed 15.05.2023).
- [2] Posts tagged 'Lockheed Martin SMSS'. UNMANNED SYSTEMS: Notes from AUVSI's 2014 Conference and Trade Show. Available at: <https://4gwar.wordpress.com/tag/lockheed-martin-smss/> (accessed 15.05.2023).
- [3] Enhancing combat effectiveness through advanced robotics. Available at: <https://milremrobotics.com/> (accessed 15.05.2023).
- [4] Boldly go where no robot has gone before. Available at: <https://clearpathrobotics.com/> (accessed 15.05.2023).
- [5] *Mobil'nye roboty, ikh tipy, vozmozhnosti i primeneniye* [Mobile robots, their types, capabilities and applications]. Available at: <https://top3dshop.ru/blog/mobile-robots-types-and-applications.html> (accessed 15.05.2023).
- [6] Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 21–26, 2001 Coex Seoul, Korea. IEEE, 2001, pp. 2590–2595.
- [7] Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching. *J. of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, v. 71 (1), pp. 85–108.
- [8] Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry for ground vehicle applications. *J. of Field Robotics*, 2006, v. 23 (1), pp. 3–20.
- [9] Semenov A.P. *Sistema upravleniya privodami mobil'nogo robota* [Mobile robot drive control system]. *Studencheskaya nauchnaya vesna. Sbornik tezisev dokladov Vserossiyskoy studencheskoy konferentsii, posvyashchennoy 170-letiyu V.G. Shukhova* [Student scientific spring. Collection of abstracts of reports of the All-Russian student conference dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhov], Moscow, April 01–30, 2023. Moscow: Publishing house «Scientific library», 2023, pp. 433–434.
- [10] Dygalo V.G., Semenov A.P. *Kontseptsiya sistemy upravleniya maloy gusenichnoy mashinoy* [Concept of a control system for a small tracked vehicle]. *Ezhegodnaya natsional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov i studentov Mytishchinskogo filiala MG TU im. N.E. Bauman po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2020 g.: sb. tezisev dokladov* [Annual national scientific and technical conference of the faculty, graduate students and students of the Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman Moscow State Technical University based on the results of research work for 2020: collection of abstracts of reports]. Krasnoyarsk: KrasSAU, 2021, pp. 101–102.
- [11] Dygalo V.G., Porvatov M.N. *Kontseptsiya realizatsii moduley maloy gusenichnoy mashiny dlya otrabotki i adaptatsii algoritma upravleniya dvizheniem* [The concept of implementing modules of a small tracked vehicle for testing and adapting the motion control algorithm]. *Ezhegodnaya natsional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov i studentov Mytishchinskogo filiala MG TU im. N.E. Bauman po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2020 g. Sbornik tezisev dokladov* [Annual national scientific and technical conference of the faculty, graduate students and students of the Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University based on the results of research work for 2020. Collection of abstracts of reports]. Krasnoyarsk: KrasSAU, 2021, pp. 85–87.
- [12] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Bukhtoyarov L.D. *Issledovanie kinematiki i dinamiki dvizhitelya gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [Study of kinematics and dynamics of the drive unit of a tracked logging machine]. *Lesotekhnicheskyy zhurnal* [Forestry journal], 2014, v. 4, no. 4 (16), pp. 179–190.

- [13] Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyaev A.M., Papunin A.V., Belyakov V.V. *Formirovanie snezhnogo pokrova v zavisimosti ot landshafta mestnosti i otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin v techenii zimnego perioda* [Formation of snow cover depending on the terrain and assessment of the mobility of transport and technological machines during the winter period]. Trudy NGTU im R.E. Alekseeva [Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev], 2013, no. 2 (99), pp. 155–160.
- [14] Jennings N., Paratin P., Jonson M. Using Intelligent Agents to Manage Business Processes. The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First Intern. Conference. London (UK), 1996, pp. 345–376.
- [15] Can We Make Our Robots Less Biased Than We Are? Available at: <https://www.nytimes.com/2020/11/22/science/artificial-intelligence-robots-racism-police.html?searchResultPosition=3> (accessed 15.05.2023).
- [16] Wong J.Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. J. of Terramechanics, 2009, 46(4), pp. 141–155.
- [17] Opletaev A.S., Zhigulin E.V., Zalesov S.V. *Opyt mnogorotatsionnogo vyrashchivaniya konteynernogo posadochnogo materiala dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya v teplitsakh s reguliruemym mikroklimatom* [Experience of multi-rotation cultivation of container planting material for artificial reforestation in greenhouses with controlled microclimate]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2023, v. 41, no. 2, pp. 152–157.
- [18] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Komarova O.V., Pokhvalenko V.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoy kornevoy sistemoy v zarubezhnykh stranakh* [Experience of creating forest crops with a closed root system in foreign countries]. Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education], 2022, no. 4 (70), pp. 179–189.
- [19] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Komarova O.V., Pilipenko V.N., Pokhvalenko V.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoy kornevoy sistemoy v stepnoy i lesostepnoy zonakh yuga Rossiyskoy Federatsii* [Experience of creating forest crops with a closed root system in the steppe and forest-steppe zones of the south of the Russian Federation]. Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education], 2022, no. 5 (70), pp. 203–211. DOI 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [20] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project. Korean J. Agric. Sci., 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [21] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings. Turkish J. Agric. For., 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [22] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation. Current Science. Indian Academy of Sciences, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [23] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kiełbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration. Croat. J. For. Eng., 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722
- [25] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter. Agron., 2020, v. 10, pp. 1938.
- [26] Markumngsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link. Agriculture. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [27] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung S.-O. Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards. Agriculture. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [28] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [29] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [30] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission. Chinese J. Mech. Eng. Springer Singapore, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [31] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine. IFAC-PapersOnLine. Elsevier Ltd, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [32] Reza M.N., Islam M.N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.J., Choi I.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. Machines. MDPI, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [33] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter. J. Mech. Sci. Technol. Korean Society of Mechanical Engineers, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [34] Iqbal M.Z., Islam M.N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y.J., Chung S.O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter. Machines, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006

- [35] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM. *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600
- [36] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter. *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [37] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System. *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [38] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force. *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [39] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

Authors' information

Dygalov Vladislav Gennadievich  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), dygalovg@bmstu.ru

Kotiev Georgiy Olegovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forestry Complex, BMSTU (Mytishchi branch)

Dygalov Lyudmila Viktorovna — Engineer of the BMSTU (Mytishchi branch)

Bychkov Georgiy Aleksandrovich — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch)

Received 18.03.2024.

Approved after review 08.10.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest