

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9703

УДК 69.059

Статья

К вопросу повышения качества лесовозных дорог на основе применения интеллектуальных советующих систем

Катаров Василий Кузьмич

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация), vkatarov@petrstu.ru

Марков Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация), vmarkov0707@mail.ru

Ратькова Елена Игоревна

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация), ratjkova@mail.ru

Степанов Артем Валерьевич

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация), stepanov@petrstu.ru

Сюнёв Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация), siounev@petrstu.ru

Получена: 4 марта 2026 / Принята: 6 мая 2026 / Опубликовано: 27 мая 2026

Аннотация: В статье анализируются исследования, направленные на выявление основных проблем разрушения лесовозных дорог и их ремонта. В отобранных статьях рассматривались характеристики лесовозных дорог и их разрушения, причинно-следственная связь образования повреждений дорожного покрытия, эксплуатация лесовозных дорог в зимний период и в межсезонье, а также ремонт и усовершенствование их конструкций. На основе результатов анализа авторы выявили основные причины повреждений, существующие подходы к ремонту лесовозных дорог и замене дорожного полотна, а также основные направления ремонта лесовозных дорог. В связи с неудовлетворительным состоянием значительной части дорожной сети Республики Карелия, включая дороги лесного

комплекса, и нехваткой средств, выделяемых на строительство и эксплуатацию дорог, авторами предложено создать систему, оптимизирующую программу дорожных работ и повышающую эффективность использования фондов. Исследования в области совершенствования лесовозных дорог предлагается проводить на стыке технологий дорог общего пользования и лесовозных дорог с использованием нейронных сетей. Проведён анализ научных работ, описывающих использование искусственного интеллекта в лесотранспортной отрасли, а также освещены технологии и методы нейронных сетей, применимые в области ремонта лесовозных дорог. На основании анализа результатов исследования, целью дальнейшего исследования является улучшение транспортных и эксплуатационных качеств лесовозных дорог путём разработки интеллектуальных систем принятия решений по их техническому обслуживанию и ремонту. Проводимые исследования включают в себя следующие вопросы: 1) разработка методики анализа состояния дорожных покрытий с использованием мобильных дорожных лабораторий для определения их ключевых повреждений, что позволит сократить время анализа значительного количества километров дорог; 2) детальное изучение материально-ресурсной базы дорожного строительства. материалы в регионе, включая географическое расположение баз и качественные характеристики материалов на них, чтобы выбрать дорожную одежду из материала ближайшего карьера; 3) проектирование и расчёт вариантов дорожных конструкций с учётом особенностей материалов региона; 4) обучение нейронной сети анализу разрушений, показанных на видеоданных, полученных с мобильных устройств дорожных лабораторий; 5) создание и интеграция алгоритма принятия решений по выбору строительных конструкций в зависимости от географического расположение объекта и его дефектов; 6) проверка адекватности разработанных методов и оценка экономического эффекта.

Ключевые слова: лесовозная дорога; нейронная сеть; ремонт лесовозных дорог

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9703

Article

Logging roads quality improvement based on intelligent advisory systems

Vasily Katarov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Petrozavodsk, Russian Federation), vkatarov@petrsu.ru*

Vladimir Markov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Petrozavodsk, Russian Federation), vmarkov0707@mail.ru*

Elena Ratkova

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Petrozavodsk, Russian Federation), ratjkova@mail.ru*

Artem Stepanov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Petrozavodsk, Russian Federation), stepanov@petrsu.ru*

Vladimir Siounev

*D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University
(Petrozavodsk, Russian Federation), siounev@petrsu.ru*

Received: 4 March 2026 / Accepted: 6 May 2026 / Published: 27 May 2026

Abstract: The paper analyzes studies focused on identifying the main problems of logging roads destruction and their repair. The selected articles examined characteristics of logging roads and their destruction, cause-effect relation of pavement damage formation, operation of logging roads during winter and off-season periods, and the repair and improvement of their structures. Based on the results of the analysis, the authors identified the main causes of damage, existing approaches to the logging roads repair and roadway replacement, and the principal directions of logging road repair. Due to the unsatisfactory condition of a significant part of the road network of the Republic of Karelia, including the roads of the forest complex and the shortage of funds allocated for the construction and operation of roads, the authors proposed to create a system that optimizes the program of road works and increases the efficiency of using funds. The research in the field of logging roads improvement is proposed to perform at the

junction of public and logging roads technologies using neural networks. The analysis of scientific papers describing the use of artificial intelligence in the timber transportation industry has been made, and technologies and methods of neural networks applicable in the field of logging road repair have been highlighted. Based on the analysis of the research results, the aim of the study is to improve the transport and operational qualities of logging roads by developing intelligent decision-making systems for their maintenance and repair. The ongoing research includes the following issues: 1) development of a methodology to analyze the condition of road surfaces using mobile road laboratories to determine their key damage that will allow shortening the time of analyzing a significant number of kilometers of roads; 2) a detailed study of the material and resource base of road construction materials in the region including the geographical location of the bases and the quality characteristics of the materials on them to select the road clothing from the material of the nearest quarry; 3) design and calculation of variants of road structures taking into account the characteristics of the materials of the region; 4) training a neural network to analyze the destruction shown on video data received from mobile devices road laboratories; 5) creation and integration of a decision-making algorithm for building structures selection depending on the geographical location of the object and its defects; 6) verification of the developed methods adequacy and assessment of the economic effect.

Keywords: logging road; neural network; repair of logging roads

1. Введение

Лесная промышленность играет ключевую роль в экономике Республики Карелия. Продукция лесопромышленного комплекса составляет примерно половину от общего объёма промышленного производства в регионе [1]. В этой связи развитие данной отрасли имеет стратегическое значение для Республики Карелия и Российской Федерации в целом. Значимость совершенствования лесной отрасли для России подтверждается тем, что в более чем в 40 субъектах доля продукции лесной отрасли составляет до 50 % от общего объёма промышленного производства [2].

Одним из основных технологических процессов лесозаготовки является вывозка древесины, которая в значительной степени зависит от состояния лесовозных автомобильных дорог.

Потребность в лесных автомобильных дорогах круглогодичного действия составляет от 25 до 30 км на 1000 га лесных земель. Для обеспечения полного охвата лесных насаждений лесохозяйственными мероприятиями необходимо наличие как минимум 10—15 км лесных автомобильных дорог на 1000 га лесного фонда [3].

В настоящее время плотность дорожной сети на территории Российской Федерации составляет в среднем 1,5 км на 1000 га лесных земель [3]. Общая протяжённость автомобильных дорог в лесном фонде страны составляет 1 млн 618 тыс. км, включая дороги общего пользования (490 тыс. км), лесохозяйственные дороги (724 тыс. км) и лесовозные дороги (403 тыс. км).

Исследования Т. Karjalainen и соавт. [4] показали, что в Северо-Западном регионе России плотность дорожной сети варьируется от 1,2 км на 1000 га в Республике Коми до 10 км на 1000 га в Ленинградской области. В Республике Карелия плотность дорог составляет 1,5 км на 1000 га в северной части, 2 км на 1000 га в центральной части и 4 км на 1000 га в южной части. Для сравнения, в Финляндии плотность дорог составляет 5 км на 1000 га в северных районах, 10 км на 1000 га в центральных районах и 20 км на 1000 га в южных районах. При этом по всем этим дорогам осуществляется транспортировка леса.

Недостаточное количество доступных лесосырьевых ресурсов, устаревшая и слабо развитая транспортная инфраструктура, недостаточный объём планово-предупредительных и профилактических работ, низкий уровень содержания и ремонта существующих дорог, а также ограниченный объём строительства новых лесовозных автомобильных дорог замедляют развитие лесопромышленного комплекса. Как показано в работе О. Н. Бурмистровой [5], при низкой плотности дорог они подвергаются более интенсивным нагрузкам, что приводит к их быстрому износу.

Причины низкой плотности дорог включают высокую стоимость дорожного строительства и ограниченные финансовые возможности арендаторов лесных участков. Кроме того, на значительной части территории Карелии отмечается низкая несущая способность почв и грунтов. Как показывают исследования А. Н. Петрова и соавт. [6],

в последние 25 лет недостаточно внимания уделялось содержанию лесовозных дорог, что привело к их неработоспособности и необходимости проведения ремонтных работ.

Низкая плотность дорожной сети приводит к тому, что лесозаготовительные работы проводятся вблизи старых транспортных путей, что вызывает переруб лесов около дорог и увеличение их износа.

Очевидна значимость дорожной сети общего пользования для республики, которая связана с расположением в непосредственной близости Карелии к высокоразвитым и стратегически важным регионам России, а также наличием выхода к Белому морю.

Автомобильные дороги в зависимости от вида собственности делятся на федеральные дороги, территориальные автомобильные дороги и ведомственные дороги.

Федеральные автомобильные дороги находятся в собственности РФ, оперативное управление которыми осуществляет Федеральная дорожная служба России, которая представлена на территории республики Карельской дирекцией федеральных дорог. Общая протяжённость таких дорог на территории республики составляет 1758 км, или 13,6 % от общей протяжённости автодорог РК.

Территориальные автомобильные дороги являются собственностью республики и находятся в оперативном управлении Комитета по строительству, эксплуатации и содержанию автомобильных дорог. Протяжённость данной категории дорог 6080 км, или почти половина всей протяжённости автомобильного сообщения республики (47 %).

По данным А. В. Степанова и соавт. [7], ведомственные дороги, принадлежащие предприятиям различных организационных форм, составляют 5097 км, или 39,4 % от всех дорог республики.

Диаграмма принадлежности дорог Карелии приведена на рисунке 1.



Рисунок 1. Диаграмма принадлежности дорог Карелии [рисунок авторов]

Figure 1. Diagram of Karelian roads classification

При этом все из анализируемых федеральных дорог представлены усовершенствованным (асфальтобетонным) покрытием. Дороги регионального значения по типам покрытия представлены следующим образом:

- с усовершенствованным (асфальтобетонным) покрытием — 1747 км;
- с песчано-гравийно-щебёночным покрытием — 3010 км;
- без покрытия (грунтовые) — 1323 км.

Ведомственные дороги, в основном, принадлежат лесной отрасли и представляют собой дороги с грунтовым покрытием.

Таким образом, с учётом всех форм собственности протяжённость дорог с асфальтобетонным покрытием составляет 3505 км (27,1 %), с песчано-гравийно-щебёночным покрытием — 3010 км (23,27 %), без покрытия (грунтовые) — 6420 км (49,63 %).

Интенсивность движения на дорогах республики, обеспечивающих межрегиональные и межрайонные связи, колеблется в пределах от 1000 до 2000 авт./сут.; интенсивность движения автодорог, обеспечивающих широтные связи и выход к западным границам, — до 3000 авт./сут. На автомобильных дорогах, обслуживающих транспортные связи в межрайонном и внутрирайонном сообщении, интенсивность движения составляет 500—1500 авт./сут.

На остальной сети территориальных дорог, обеспечивающих перевозки грузов и пассажиров преимущественно во внутрирайонном сообщении, размеры транспортных потоков не превышают 300—500 авт./сут.

Средняя интенсивность движения по дорогам Республики Карелия приведена на рисунке 2.

Теоретические исследования М. И. Афонинной и соавт. [8] и Е. И. Бавбеля и соавт. [9] позволили выявить многочисленные определения и концепции транспортной доступности территорий. Согласно общему мнению, «индикаторы доступности описывают расположение области по отношению к возможностям, деятельности или активам, существующим в других областях и в самой области, где "областью" может быть регион, город или коридор».

Таким образом, Карелию можно рассматривать как один из регионов России со значительным потенциалом развития. По территории республики проходят два автомобильных коридора, обеспечивающих транзит грузов, в т. ч. из древесины глубокой переработки, из южных и центральных регионов России в Мурманскую область: «Мурманск — Санкт-Петербург — Новгород — Тверь — Москва — Тула — Воронеж — Ростов-на-Дону — Краснодар — Новороссийск — Сочи» и «Санкт-Петербург — Каргополь — Котлас — Сыктывкар — Кудымкар — Пермь с подходами Пудож — Медвежьегорск — Костомукша — граница с Финляндией».

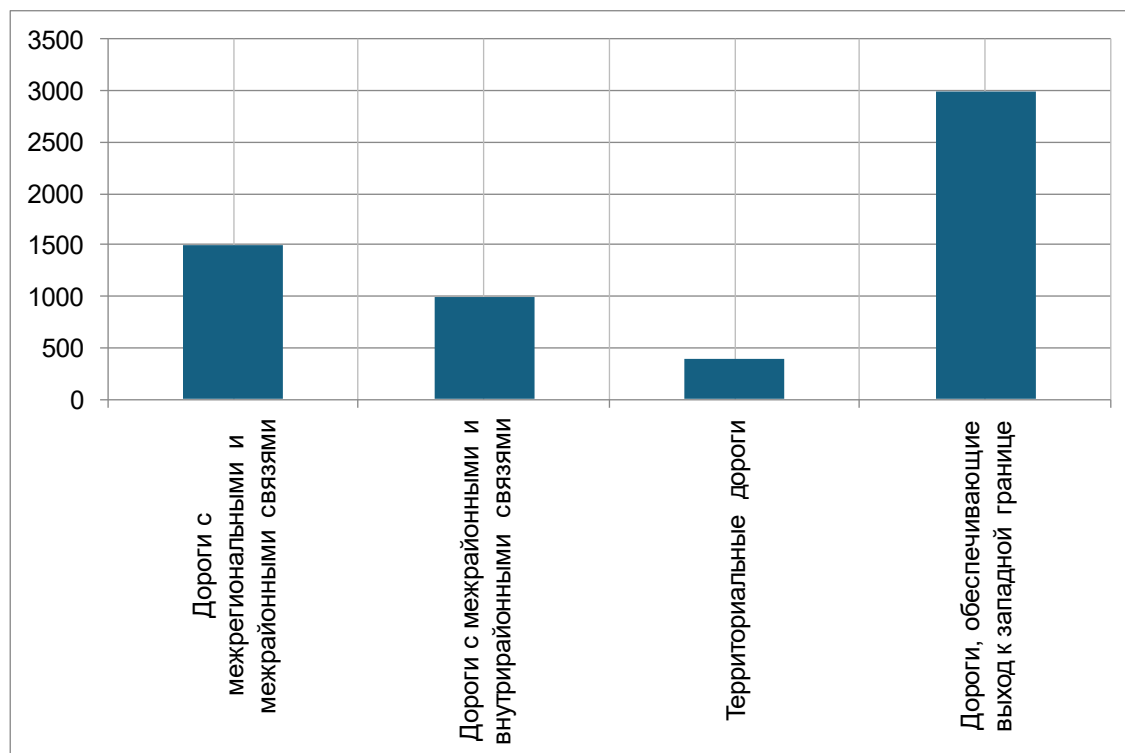


Рисунок 2. Средняя интенсивность движения по дорогам Республики Карелия, авт./сут. [рисунок авторов]

Figure 2. Average traffic intensity on the roads of the Republic of Karelia, cars/day

Время в пути зависит от различных факторов, которые включают:

- физическое (географическое) расстояние между точками;
- техническую возможность установления прямого маршрута, т. е. необходимость отклонения от прямого маршрута из-за водных преград, особенностей ландшафта и других естественных непроходимых препятствий;
 - степень оптимальности маршрута на реальном транспортном сообщении, т. е. степень его отклонения от кратчайшего технически осуществимого маршрута;
 - качество существующего транспортного сообщения, например, тип и состояние дорожного покрытия.

Отсюда из-за практического отсутствия альтернативных путей доставки лесного сырья потребителям транспортная сеть Республики Карелия должна быть рассмотрена как единая система. А если учесть тот факт, что подавляющая протяжённость дорог общего пользования представлена низкими категориями, где конструкции и многие другие параметры схожи, то и подходы к их ремонтным работам должны быть близки.

Эффективное освоение лесных ресурсов Республики Карелия возможно при наличии хорошо развитой транспортной инфраструктуры. Чем выше плотность лесных и автомобильных дорог общего пользования, тем короче расстояние вывозки леса, меньше затраты времени и транспортные расходы. Аспекты планирования оптимальной сети лесовозных

дорог в Республике Карелия рассмотрены в работах таких специалистов, как В. К. Катаров и соавт. [10] и Ю. Ю. Герасимов и соавт. [11].

В статье В. К. Катарова и соавт. [10] приведены методы оптимального проектирования сетей лесных дорог, позволяющие провести автоматизацию процессов планирования дорожно-транспортной инфраструктуры лесозаготовительных предприятий, описана методика и приведены результаты нахождения оптимальной плотности лесных дорог для природно-производственных условий Северо-Западного федерального округа. Опыт развития транспортной инфраструктуры лесной отрасли Финляндии рассмотрен в работе Ю. Ю. Герасимова и соавт. [11]. Вопросы эксплуатации лесовозных дорог отражены в работах И. Р. Шегельмана и соавт. [12], [13] и В. С. Сюнёва и соавт. [14].

В словаре И. Р. Шегельмана [12] приведена классификация лесных дорог по назначению: лесовозные дороги, предназначенные для вывозки древесины; лесохозяйственные дороги, обеспечивающие выполнение лесохозяйственных мероприятий; противопожарные дороги, обеспечивающие доступ в пожароопасные районы; хозяйственные дороги, предназначенные для перевозки грузов от путей общего пользования до предприятий; туристические дороги, ведущие к туристическим базам, зонам отдыха и охотничьим хозяйствам.

В последнее время, согласно исследованиям В. С. Сюнёва и соавт. [14], используется сортиментная технологии транспортировки лесных материалов. Это требует адаптации подходов к проектированию дорог с учётом движения сортиментовозов, обладающих меньшей проходимостью по сравнению с хлыстовыми лесовозными автопоездами и большей нагрузкой на ось.

Как показывают исследования А. В. Питухина и соавт. [15], конструкции дорожного полотна должны учитывать структуру нагрузок, интенсивность вывозки и логистику перевозок [14]. Из-за воздействия колёс подвижного состава и природных факторов происходит износ и деформация земляного полотна, водоотводных сооружений и дорожной одежды. Несоблюдение технологии строительства и снижение его качества также влияют на появление деформаций.

Эксплуатационные качества автомобильных дорог характеризуются рядом критериев, таких как прочность дорожной одежды, ровность проезжей части, сопротивление качению автомобиля, шероховатость покрытия и другие параметры. Исследования А. Н. Петрова [16] показали, что надёжность дорожной конструкции определяется как вероятность изменения эксплуатационных характеристик до предела, требующего обычного или капитального ремонта.

Неудовлетворительное состояние значительной части дорожной сети Республики Карелия, включая дороги лесного комплекса, и дефицит средств, направляемых на строительство и эксплуатацию дорог, привели к необходимости создания системы, оптимизирующей программу дорожных работ и повышающей эффективность использования средств. При этом исследования в области усовершенствования лесовозных дорог необходимо проводить на стыке технологий дорог общего пользования и лесовозных дорог с использованием нейронных сетей.

2. Материалы и методы

Цель работы состоит в изучении и анализе результатов исследований, связанных с вопросами транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог.

Основной задачей исследования является выявление основных проблем, возникающих при проведении анализа разрушений лесовозных дорог и принятии решений по их ремонту с целью разработки методики анализа состояния дорожных покрытий с использованием искусственного интеллекта и выработки рекомендаций по назначению конструкций дороги в зависимости от географии расположения объекта и её дефектов.

Анализ исследований проводился в следующих направлениях: специфические особенности лесовозных дорог, наиболее часто встречаемые и специфические разрушения лесовозных дорог, причинно-следственные связи возникновения разрушений дорожного покрытия, взаимодействие движителей лесных машин с почвогрунтами, эксплуатация лесовозных дорог в зимние и межсезонные периоды, ремонт и усовершенствование их конструкций.

По результатам анализа выявлены основные причины возникновения разрушений, обозначены существующие подходы к вопросу ремонта и капитального ремонта лесовозных дорог, определены основные направления в области ремонта лесовозных дорог.

Также сделан анализ научных трудов, описывающих использование искусственного интеллекта в лесотранспортной отрасли, выделены технологии и методы нейронных сетей, применимые в области ремонта лесовозных дорог.

На основании анализа результатов исследований сформулирована цель исследования и поставлены задачи для её достижения.

3. Результаты

Лесовозные дороги имеют наибольшие грузообороты и, соответственно, наиболее высокие требования к техническим параметрам дорог. Состояние дорожной сети зависит от качества ремонта и содержания, а также от прочности дорожного покрытия и его способности выдерживать нагрузки.

В статье А. В. Степанова и соавт. [7] приведены специфические особенности лесовозных дорог: высокая нагрузка на ось расчётного автомобиля, сезонная эксплуатация, сложные грунтовые и гидрологические условия.

Наиболее часто встречаемые разрушения лесовозных дорог:

- ✓ Разрушения земляного полотна:
 - просадки и провалы — из-за слабых грунтов, переувлажнения, недостаточного уплотнения;
 - оползни откосов — особенно на косогорных участках;
 - размывы обочин и откосов — вследствие поверхностного стока воды;

- морозное пучение и пучины — в зимний период при промерзании переувлажнённых грунтов;
- расползание насыпей — на глинистых грунтах при переувлажнении.
- ✓ Разрушения дорожных одежд:
 - колейность — глубокая колея от тяжёлых лесовозов, особенно на грунтовых и гравийных дорогах, имеет структурный характер;
 - гребёнка — от динамических ударов колёс с частотой колебания подвески и выбивания материала покрытия;
 - выбоины и ямы — выкрашивание материала покрытия под действием нагрузок и влаги;
 - волны и наплывы — пластические деформации в асфальтобетонных покрытиях при высоких нагрузках;
 - расслоение слоёв — нарушение сцепления между слоями дорожной одежды;
 - трещины (поперечные, продольные, сетка трещин) — усталостные и температурные разрушения.
- ✓ Специфические разрушения лежнёвых дорог:
 - излом лежней под нагрузкой;
 - смещение лежней относительно друг друга;
 - загнивание древесины при длительном использовании;
 - просадка между лежнями из-за продавливания грунта.
- ✓ Разрушения водоотводных сооружений:
 - засорение канав и кюветов;
 - размыв водопропускных труб и мостов;
 - обрушение оголовков труб.

Установлением причинно-следственной связи возникновения разрушений занимались А. В. Питухин и соавт. [17], К. В. Хорошилов и соавт. [18], А. П. Мохирев и соавт. [19], С. С. Петросян и соавт. [20], А. В. Андронов и соавт. [21].

А. В. Питухин и соавт. [17] предложили метод оценки вероятности усталостного разрушения дорожного покрытия на основе уравнения Пэриса, описывающего скорость роста усталостной трещины. В методе используются как линейная, так и скорректированная линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений. Для вероятностного описания процесса усталости используется метод статистической линеаризации. Распределение срока службы полагалось логнормальным.

Вопросы прочности талых и мёрзлых грунтов как материалов лесных дорог рассмотрены в работе К. В. Хорошилова и соавт. [18]. В указанной работе разработана методика определения модуля упругости и оценки растягивающих напряжений мёрзлого песчаного грунта с развивающейся трещиной.

При управлении сложной системой строительства и эксплуатации автодороги необходимо применять многофакторное моделирование. По результатам исследований А. П. Мохирева

и соавт. [19] выделены факторы, имеющие наибольшее влияние на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа: влажность грунта; материал дорожной одежды; температура воздуха и солнечная радиация; величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель давления в автомобильных шинах; количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями; плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна.

В работе С. С. Петросяна и соавт. [20] предложена математическая модель образования колеи на лесном грунте, учитывающая его частичное восстановление при снижении и снятии нагрузки, а также необратимые деформации, ограниченные по величине.

Вопросы моделирования поведения лесного грунта под нагрузкой также рассмотрены в статье А. В. Андропова и соавт. [21]. На основе решения уравнения образования колеи авторами получены аналитические выражения, учитывающие как постепенное, так и возможно более резкое изменение механических свойств грунта по глубине, позволяющие моделировать взаимодействие движителя машины с грунтом в особо сложных условиях, представленных задернованными грунтами.

Исследованиями взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек занимались О. Н. Бурмистрова и соавт. [22], В. А. Борисов и соавт. [23], Е. Г. Хитров и соавт. [24—26], Н. В. Савенкова [27], А. А. Кривошеев и соавт. [28], В. Е. Божбов и соавт. [29], В. А. Каляшов и соавт. [30], М. Н. Дмитриева и соавт. [31].

В статье О. Н. Бурмистровой и соавт. [22] приведён анализ физико-механических свойств почвогрунтов как поверхностей движения гусеничных вездеходных машин, который показал, что основными параметрами для разработки математической модели взаимодействия гусеничного движителя с почвогрунтом являются модуль общей деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения, несущая способность и сопротивление почвогрунта сдвигу.

Исследования В. А. Борисова и соавт. [23] посвящены определению величины деформаций, возникающих в конструкции гравийной лесовозной автомобильной дороги в зависимости от скорости движения лесовозного автопоезда и состояния поверхности дорожного покрытия.

В работах Е. Г. Хитрова и соавт. предложены математические модели, предназначенные для расчёта показателей колееобразования и тягово-сцепных свойств движителей машин [24], и математическая модель взаимодействия движителей лесных машин со слабо-несущими опорными поверхностями [25]. Авторы также исследовали взаимосвязи свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин, описываемые степенными функциями [26].

Влияние тяжёлого лесовозного транспорта на дорожное покрытие рассмотрела Н. В. Савенкова [27].

В статье А. А. Кривошеева и соавт. [28] обосновывается необходимость изучения негативного воздействия колёсных валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах.

Анализом подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек занимались В. Е. Божбов и соавт. [29].

В статье В. А. Каляшова и соавт. [30] представлена оценка технологических свойств оттаивающих почвогрунтов под нагрузкой от движителя лесной машины на склонах.

В статье М. Н. Дмитриевой и соавт. [31] приведён анализ физико-механических свойств почвогрунтов как поверхностей движения трелёвочной техники и подходов к оценке параметров взаимодействия колёсного движителя с почвогрунтом.

В условиях Республики Карелия большое значение имеют исследования эксплуатации лесовозных дорог в зимние и межсезонные периоды.

В работе Т. А. Гаврилова и соавт. [32] исследованы условия появления и параметры морозобойных трещин в верхнем слое автомобильной дороги при сезонном промерзании, представлена математическая модель формирования морозобойных трещин в грунтах.

Закономерности функционирования временных лесных дорог в зимний и межсезонные периоды исследованы в работе К. В. Хорошилова и соавт. [33]. Рассмотрены особенности температурных деформаций грунтового дорожного полотна, которые могут быть причиной разрушения дорожного полотна, дано обоснование рекомендаций по совершенствованию временных лесных дорог в межсезонные периоды.

В статье А. П. Мохирева и соавт. [34] дана оценка несущей способности грунтов основания зимней лесовозной дороги на основе полевых и лабораторных испытаний, а также разработаны рекомендации по допустимым нагрузкам и режимам эксплуатации данной дороги.

В работе В. С. Сюнёва и соавт. [35] приведены исследования воздействия циклов «замораживание — оттаивание» на деформационные свойства лесных почвогрунтов Карелии в межсезонные периоды.

Механизм образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах рассмотрен в работе О. Н. Бурмистровой и соавт. [36].

Расчёт промерзания грунтов и зимнего влагонакопления при строительстве лесовозных автомобильных дорог рассмотрен в статье Р. С. Сапелкина и соавт. [37]. В работе также произведён анализ многолетнего статистического наблюдения за температурным режимом и его влияния на устойчивость земляного полотна.

В статье С. Е. Рудова и соавт. [38] представлены методика, аппаратное обеспечение и результаты натурных экспериментальных исследований по определению влияния температуры мёрзлого почвогрунта на его прочностные и деформационные свойства.

Исследования по изучению формирования слоя уплотнённого покрытия на проезжей части в зависимости от количества выпадающих осадков проведены И. Н. Кручининым и соавт. [39]. Проведены оценка степени влияния плотности выпадающего снега на величину

уплотнённого слоя и оценка глубины колеи на уплотнённом снежном покрытии. Рекомендованы значения предельной глубины колеи на покрытии для различных дорожно-климатических подзон. Возможности повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог в различных сезонных условиях Свердловской области представлены в работе авторов [40]. Рассмотрено влияние сезонности на физико-механические характеристики дорожных конструкций.

Модель управления системой «дорожные условия — транспортные потоки», позволяющая обеспечивать функционирование комплекса «водитель — автомобиль — дорога — среда» в любых условиях погоды и климата, предложена В. Г. Козловым и соавт. [41]. Авторами проведены комплексные экспериментальные исследования по выявлению характера и пределов изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды [42].

В работе П. В. Тихомирова и соавт. [43] приведены результаты исследований определения стандартов отклонений от проектных параметров и даны рекомендации по контролю строительства дорожных закруглений. Авторами также предложен метод изыскания, определяющий область применения кубической параболы в соответствии с действующими нормами проектирования [44].

Необходимость проведения анализа взаимосвязей лесопромышленной отрасли с другими отраслями производства на основе математических моделей обосновывается в работе О. Н. Бурмистровой и соавт. [45].

В работе Ю. Н. Пильника и соавт. [46] разработана модель планирования оптимального использования лесовозного транспорта по сети автомобильных дорог.

Исследования А. П. Мохирева и соавт. [47] посвящены разработке компьютерного приложения, выполняющего основные вычисления и рассчитывающего оптимальные технологические последовательности операций производственного процесса лесозаготовительного предприятия.

В статье А. П. Мохирева и соавт. [48] рассматривается вопрос об определении ключевых природно-климатических факторов, оказывающих влияние на стоимость строительства и содержание лесных дорог, а также на удельную стоимость вывозки заготовленной древесины. Авторами выявлены наиболее благоприятные условия для транспортировки заготовленного леса. В работе [49] рассмотрены основные показатели определения эффективности логистической цепочки, такие как производительность, трудозатраты, себестоимость.

Вопросы усовершенствования конструкций лесовозных дорог и применяемых материалов рассмотрены в работах С. А. Чудинова и соавт. [50—52] и И. Н. Кручинина [53], [54].

С. А. Чудиновым и соавт. [50] исследованы технологии дорожного строительства на территориях с дефицитом каменных материалов с устройством конструктивных слоёв дорожных одежд из укреплённых грунтов, сделан сравнительный анализ деформаций дорожных одежд из фиброцементогрунта и цементогрунта без добавки фиброволокна. Также авторы

[51] установили влияние добавки фибры на процесс структурообразования и динамику набора прочности. Установлено [52], что при средней дальности возки до 30 км стоимость устройства дорожной одежды из фиброцементогрунта практически одинакова по сравнению с использованием традиционных материалов — песка и щебня, с увеличением дальности возки стоимость устройства дорожной одежды из фиброцементогрунта более экономически эффективна, чем равнопрочная конструкция из инертных материалов.

В работе И. Н. Кручинина [53] проведены исследования по изучению изменения зернового состава при уплотнении щебней из различных горных пород в лабораторных условиях на роллерном компакторе. Проведена оценка степени влияния размеров измельчённых частиц на структурную прочность. Также автором рассмотрено влияние катков на уплотняемый каменный материал при строительстве лесовозных дорог и получены зависимости его взаимодействия с вибровальцами катков. Разработаны рекомендации по уплотнению конструктивных слоёв при строительстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог с использованием местных низкопрочных каменных материалов [54].

Вопросы возникновения разрушений и ремонта лесовозных дорог рассматриваются в работах таких учёных, как В. Л. Нгуен [55], А. В. Руденский [56], Р. А. Корольков и соавт. [57], Т. В. Дормидонтова и соавт. [58], Д. В. Клыбик [59], С. И. Сушков и соавт. [60].

В статье В. Л. Нгуен [55] рассмотрены вопросы образования трещин на покрытиях автомобильных дорог, снижающих безопасность и комфортность движения, а также вопросы повышения трещиностойкости асфальтобетонных покрытий путём армирования покрытий геосетками.

В работе А. В. Руденского [56] рассмотрены пути повышения эксплуатационной долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий путём сокращения образования выбоин в процессе эксплуатации. Показано, что эта задача может быть решена совершенствованием технологии производства асфальтобетонных смесей и улучшением системы технических требований к асфальтобетону, обеспечивающих повышение его водостойкости.

Анализ причин колееобразования на асфальтобетонном покрытии приведён в работе Р. А. Королькова и соавт. [57]. Согласно исследованиям, установлено, что причиной образования колеи на покрытии дорожной одежды является деформирование основания, слой которого расположен ниже восстановленного слоя износа.

В статье Т. В. Дормидонтовой и соавт. [58] приводится описание типов колеености, причин их образования и характерных признаков. Рассмотрены колея сдвига, структурная колея и абразивная колея.

Причины образования трещин на асфальтобетонных покрытиях и их влияние на состояние дорожной одежды исследованы в работе Д. В. Клыбик [59].

В статье С. И. Сушкова и соавт. [60] сформулирован алгоритм образования трещин на покрытии лесовозных автомобильных дорог, устраиваемых на склоне, в основании которых залегает глинистый грунт. Рассмотрены возможные причины влагопереноса

с физической точки зрения, движение грунтовой влаги в зону охлаждения, условия формирования трещин.

Таким образом, основные причины возникновения разрушений можно разделить на следующие группы:

- природные факторы — сложные грунтовые условия (торфяники, глинистые грунты); высокая влажность грунтов и поверхностных вод; резкие перепады температур, морозное пучение; обильные осадки;
- эксплуатационные факторы — высокие осевые нагрузки от лесовозного транспорта; сезонность эксплуатации (весенняя распутица); интенсивное движение тяжёлой техники; недостаточные содержание и ремонт;
- технологические факторы — ошибки проектирования (неверный расчёт прочности); нарушение технологии строительства; использование низкокачественных материалов; отсутствие или недостаточное дренажное обеспечение.

Существующие подходы к вопросу ремонта и капитального ремонта лесовозных дорог:

1. Теория восстановления (усиления) несущей способности [55]. Основана на концепции усиления слабых зон дорожной конструкции и включает следующие методы:

- укрепление основания инъекционными методами;
- армирование геосинтетическими материалами;
- укрепление грунтов вяжущими (цемент, известь, битумные эмульсии);
- устройство дренажных систем для отвода воды;
- устройство дополнительных несущих слоёв.

2. Теория локального ремонта [56]. Предполагает устранение отдельных дефектов без полной замены покрытия:

- ямочный ремонт с использованием литых асфальтобетонов;
- заполнение трещин герметизирующими составами;
- струйно-инъекционный метод для выбоин.

3. Теория регенерации асфальтобетонных покрытий [57]. Включает методы восстановления свойств старого асфальтобетона:

- горячая регенерация (термопрофилирование);
- холодная регенерация с добавлением вяжущих;
- устройство дополнительных слоёв усиления (асфальтобетон, щебень, гравий);
- применение композитных материалов для усиления слабых участков;
- рециклинг с повторным использованием материалов.

4. Теория профилактического обслуживания [58]. Акцент делается на предотвращение разрушений:

- поверхностная обработка (слои износа);
- профилирование грунтовых дорог;
- обеспыливание гравийных покрытий;
- ремонт и очистка водоотводных сооружений;

- пропитка битумными эмульсиями;
- защитные покрытия.

5. Теория комплексного ремонта [59]. Сочетает несколько методов для достижения максимального эффекта:

- полная замена покрытия с усилением основания;
- устройство дренажных систем;
- применение современных материалов (полимермодифицированные битумы, геосетки).

6. Теория ремонта лежнёвых покрытий. Включает специфические методы для лежнёвых дорог:

- замена повреждённых лежней;
- усиление лежнёвого покрытия дополнительными поперечинами;
- обработка древесины антисептиками для предотвращения гниения;
- устройство защитного слоя из гравия или щебня поверх лежней.

Современные исследования в области ремонта лесовозных дорог развиваются по следующим направлениям:

1. Применение геосинтетических материалов — геосеток, геотекстилей, георешёток для армирования и дренажа.

2. Использование местных материалов — укрепление грунтов золой, шлаками, отходами деревообработки.

3. Цифровые технологии — системы мониторинга состояния дорог, предиктивный ремонт.

4. Экологичные решения — рециклинг материалов, минимизация воздействия на окружающую среду.

5. Применение нанотехнологий — использование наноструктурированных модификаторов для улучшения свойств асфальтобетонов.

6. Умные материалы — применение самовосстанавливающихся покрытий с капсулированными вяжущими.

4. Обсуждение и заключение

Анализ результатов исследований существующих теорий и методов ремонта показывает, что:

- нет универсального метода, подходящего для всех случаев разрушения;
- выбор метода должен основываться на диагностике причин разрушения и условий эксплуатации;
- перспективные направления связаны с применением новых материалов и технологий;
- комплексный подход (усиление основания, дренаж, ремонт покрытия) даёт наилучшие результаты по долговечности отремонтированных участков;
- особое внимание следует уделять профилактике разрушений через регулярное обслуживание.

В последнее время для повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог целесообразно применять интеллектуальные системы принятия решений.

Нейронные сети стали широко применяться во многих отраслях экономики, однако эта технология ещё находится на начальных этапах своего развития. На сегодняшний день не так много научных трудов, описывающих использование искусственного интеллекта в лесотранспортной отрасли.

Исследования И. О. Темкина и соавт. [61] связаны с распознаванием и отслеживанием дефектов дорожного покрытия в режиме реального времени. Предложена система, способная выявлять дефекты дорожного покрытия с помощью глубоких нейронных сетей и отслеживать их путём присвоения уникальных идентификаторов. Отслеживание дефектов реализовано с помощью венгерского алгоритма, позволяющего эффективно устанавливать соответствия между обнаружениями в последовательных кадрах, и фильтра Калмана, который сглаживает траектории и прогнозирует будущие положения дефектов.

Работа С. А. Чудинова и соавт. [62] посвящена разработке нейронечёткой сети для расчёта стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта с учётом различного расстояния по доставке портландцемента и фиброволокна на примере Свердловской области. Разработанная модель интеллектуальной системы в среде Matlab может использоваться при технико-экономическом обосновании вариантов конструкций дорожных одежд и снижении стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог.

Исследования В. В. Побединского и соавт. [63] связаны с разработкой нейронной сети для оценки технологических решений устройства лесных дорог. Результатом исследований явилась разработка адаптивной нейронечёткой сети типа ANFIS, которая позволяет рассчитать стоимость дорожного покрытия в зависимости от основных технологических и исходных финансовых параметров.

В работе Е. Caliskan и соавт. [64] рассмотрены вопросы изучения сети лесных дорог по ортофотоснимкам высокого разрешения на основе глубокого обучения. В исследовании были использованы четыре различные модели глубокого обучения: AlexNet, ResNet-50, InceptionResNet-V2 и U-Net. Результаты исследований показывают, что модели семантической сегментации ResNet-50 и InceptionResNet-V2 могут быть точно и эффективно использованы для изучения лесных дорог.

Можно выделить следующие направления применения искусственного интеллекта и нейронных сетей:

✓ Мониторинг состояния дорог [61]:

▪ автоматическое обнаружение дефектов покрытия (колеи, выбоины, просадки).

С помощью квадрокоптера и камер с компьютерным зрением выявляются колеи, выбоины, просадки, трещины. Используются CNN-модели для сегментации изображений и классификации дефектов. Точность обнаружения достигает 85—92 %;

- оценка несущей способности земляного полотна. Датчики влажности и георадарные системы в сочетании с RNN-моделями прогнозируют несущую способность грунта с учётом сезонных изменений;

- прогнозирование развития разрушений. Гибридные модели ИИ (нейросети + физические модели грунтовых процессов) прогнозируют развитие колейности, пучин, просадок на 3—6 мес. вперёд.

- ✓ Оптимизация логистики лесоперевозок:

- маршрутизация лесовозного транспорта. Алгоритмы машинного обучения (кластеризация K means, градиентный бустинг) оптимизируют маршруты с учётом состояния дорог, погодных условий, загрузки техники;

- прогнозирование пропускной способности участков. RNN/LSTM-модели прогнозируют пропускную способность участков на основе данных о влажности грунта, осадках, интенсивности движения;

- оптимизация графиков вывоза древесины. Генетические алгоритмы и reinforcement-learning планируют вывоз с учётом сезонности, доступности дорог, спроса на древесину.

- ✓ Управление строительством и ремонтом [62]:

- планирование строительства новых веток. ГИС-системы с ИИ анализируют рельеф, грунты, гидрологию для выбора оптимальных трасс. Используются гибридные модели (нейросети + методы многокритериальной оптимизации);

- подбор оптимальных конструкций дорожных одежд. ANFIS-сети (адаптивные нейро-нечёткие системы) подбирают конструкции для конкретных участков с учётом грунтовых условий и нагрузок;

- контроль качества строительства с помощью компьютерного зрения.

Среди всех технологий и методов нейронных сетей наиболее подходящими для вышеперечисленных направлений подходят:

1. Свёрточные нейронные сети (CNN) [64]. Используются для обработки изображений с дронов и видеокамер, автоматического обнаружения дефектов покрытия и контроля состояния водоотводных сооружений.

2. Рекуррентные нейронные сети (RNN/LSTM). Применяются для прогнозирования состояния дорог на основе временных рядов данных (влажность грунта, осадки, интенсивность движения). Позволяют учитывать сезонность эксплуатации.

3. Кластеризация и классификация. Методы машинного обучения для:

- K means, DBSCAN — группировка участков дорог по состоянию;
- RandomForest, XGBoost — классификация грунтов по несущей способности;
- SVM — обнаружение аномалий в данных с датчиков.

4. Гибридные модели ИИ [36]. Сочетание нейронных сетей с физическими моделями грунтовых процессов для:

- ANFIS (AdaptiveNeuroFuzzyInferenceSystem) — сочетание нейросетей и нечёткой логики для оценки стоимости строительства и выбора конструкций;

- сочетание нейросетей и физических моделей — для прогнозирования морозного пучения, просадки насыпей;
- сочетание градиентного бустинга и ГИС — для оптимизации трасс и логистики.

Отдельным вопросом, подлежащим рассмотрению, является система принятия решений по ремонту лесовозных дорог. Системы поддержки принятия решений (СППР) в области ремонта лесовозных дорог представляют собой комплекс программных и методологических инструментов, позволяющих:

- оценивать текущее состояние дорожной сети;
- прогнозировать развитие дефектов с учётом сезонности и нагрузок;
- оптимизировать распределение ресурсов на ремонт;
- выбирать оптимальные технологии ремонта для конкретных участков.

При этом критериями оптимизации СППР являются:

- минимизация затрат на ремонт при обеспечении требуемого уровня надёжности;
- максимизация срока службы после ремонта;
- учёт сезонности (проведение работ в сухие периоды);
- ограничение по доступным ресурсам (финансы, техника, материалы).

Современные СППР интегрируются с ERP-системами лесозаготовительных предприятий (учёт техники, материалов), системами логистики (оптимизация вывоза древесины) и ГИС-платформами (анализ рельефа, грунтов, гидрологии).

Преимуществами интеграции являются единый информационный контур для принятия решений, синхронизация графиков ремонта с планами лесозаготовок, а также оптимизация использования техники (совмещение строительных и транспортных работ).

Применение искусственного интеллекта на лесовозных дорогах сталкивается с рядом специфических проблем:

- дефицит данных: недостаток размеченных данных о состоянии удалённых участков;
- сложные условия: высокая влажность, обледенение, снежные заносы затрудняют сбор данных;
- удалённость: отсутствие стабильной связи для передачи данных в реальном времени;
- сезонность: необходимость адаптации моделей к разным сезонам эксплуатации;
- стоимость: высокая цена внедрения систем искусственного интеллекта в условиях низкой плотности дорог.

К ключевым путям развития на ближайшие годы можно отнести:

1. Edge AI — внедрение искусственного интеллекта на периферийных устройствах (квадрокоптерах, датчиках) для обработки данных без передачи на сервер.
2. Цифровые двойники — создание виртуальных моделей лесовозных дорог для прогнозирования их состояния и оптимизации обслуживания.
3. Гибридные модели — создание моделей, сочетающих глубокое обучение с физическими моделями грунтовых процессов.
4. Автоматизированные системы управления — интеграция искусственного интеллекта с системами управления лесозаготовками и транспортом.

Анализ показывает, что:

- ИИ и нейронные сети становятся важным инструментом для повышения эффективности эксплуатации лесовозных дорог;
- наиболее исследованные применения — мониторинг состояния и оптимизация логистики;
- перспективные направления связаны с Edge AI, цифровыми двойниками и гибридными моделями;
- основными барьерами остаются дефицит данных, сложные условия эксплуатации и высокая стоимость внедрения;
- дальнейшее развитие требует создания специализированных баз данных и адаптации моделей к сезонным условиям.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в области разработки адаптивных моделей искусственного интеллекта, учитывающих региональные особенности лесозаготовок, а также необходимо сосредоточиться на создании унифицированных платформ для обмена данными между различными системами искусственного интеллекта в лесной отрасли.

На основании анализа литературных источников сформулирована цель исследования: повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог путём разработки интеллектуальных систем принятия решений по их содержанию и ремонту.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать методику анализа состояния дорожных покрытий с использованием мобильных дорожных лабораторий с целью определения их ключевых разрушений. Это позволит проводить анализ значительного количества километров дорог за непродолжительное время. Выполнить типизацию дефектов дорожных покрытий (объединить дефекты в группы по причинно-следственной связи их появления для дальнейшего понимания вида проводимых ремонтных работ).
2. Детально исследовать материально-ресурсную базу дорожно-строительных материалов региона, включающую географическое положение баз и качественные характеристики материалов на них. Это позволит подбирать расчётный рабочий конструктив дорожной одежды из материала ближайшего карьера.
3. Выполнить проектирование и расчёт вариантов дорожных конструкций с учётом характеристик материалов региона.
4. На основе полученного видеоряда с использованием мобильных дорожных лабораторий выполнить обучение нейронной сети проводить анализ разрушений. Это в значительной степени ускорит анализ состояния покрытия и уменьшит человеческий фактор в ошибках при определении вида и характера разрушения.
5. Создание и интеграция алгоритма принятия решений по назначению строительных конструкций в зависимости от географии расположения объекта и его дефектов.
6. Проверить адекватность разработанных методов и оценить экономический эффект применения системы.

Список литературы

1. Официальный интернет-портал республики Карелия. URL: <http://www.gov.karelia.ru/Leader/Document/Les/a02.html>. Текст: электронный.
2. Трофимова Н. В., Сазыкина М. Ю., Мамлеева Э. Р. Особенности развития лесопромышленного комплекса в регионах Российской Федерации // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 118—126.
3. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653?marker=65A0IQ>. Текст: электронный.
4. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia: final report of the research project / Т. Karjalainen, Т. Leinonen, Y. Gerasimov [et al.] // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. Joensuu: Metla, 2009. Vol. 110. 151 p.
5. Бурмистрова О. Н. Повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог в условиях Северо-Западного региона: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Воронеж, 2006. 392 с.
6. Петров А. Н., Степанов А. В. Оценка качества содержания лесовозных автомобильных дорог // Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия: Материалы Третьей республикан. научно-практ. конф. молодых учёных, аспирантов, докторантов. Петрозаводск, 2012. С. 33—35.
7. Степанов А. В., Груздов А. В. Экспериментальная оценка состояния дорог Карелии, подверженных активному воздействию лесовозного транспорта // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 4. С. 160—173.
8. Афонина М. И., Перевозчиков Б. Ф., Селиверстов В. А. Автомобильные дороги и мосты. Биологические методы укрепления откосов и рекультивация земель, нарушаемых при строительстве автомобильных дорог. М.: Информавтодор, 2007. № 5.
9. Бавбель Е. И., Лыщик П. А. Обоснование размещения лесотранспортных сетей // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2009. № 4. С. 82—88.
10. Катаров В. К., Рожин Д. В., Сюнёв В. С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 32—47.
11. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли — опыт Финляндии / Ю. Ю. Герасимов, С. Карвинен, В. С. Сюнёв [и др.] // Транспортное дело России. 2009. № 7. С. 99—102.
12. Шегельман И. Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: Словарь. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 278 с.
13. Шегельман И. Р., Щёголева Л. В., Лукашевич В. М. Обоснование периода эксплуатации зимних лесовозных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2007. № 2. С. 54—57.
14. Сюнёв В. С., Соколов А. П., Коновалов А. П. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия // Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2008. 126 с.
15. Питухин А. В., Петров А. Н. Расчёт дорожных конструкций лесовозных автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2011. № 1 (86). С. 120—123.
16. Петров А. Н. Повышение эксплуатационной надёжности дорожных покрытий // Опыт лесопользования в условиях Северо-Запада РФ и Фенноскандии: Материалы междунар. научно-техн. конф., посвящённой 60-летию лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск, 2011. С. 27—28.
17. Метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной автомобильной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия / А. В. Питухин,

- А. Н. Петров, В. И. Марков [и др.] // Транспортное дело России. 2013. № 2 (105). С. 15—18.
18. Прочность и модуль упругости мёрзлых песчаных грунтов как материала лесозаготовительной дороги / К. В. Хорошилов, В. К. Катаров, Т. А. Гаврилов [и др.] // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 3. С. 33—43.
19. Анализ факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа / А. П. Мохирев, В. В. Серватинский, П. О. Дудин [и др.] // Resources and Technology. 2024. Т. 21, № 2. С. 114—128.
20. Модель образования колеи на линейно-упрочняющемся грунте при периодической нагрузке / С. С. Петросян, Д. В. Отмахов, В. Г. Алексеенко [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 238. С. 88—98.
21. Математические модели сжатия упрочняющегося грунта для расчёта колееобразования в элементарных функциях / А. В. Андронов, Г. С. Тарадин, Д. В. Болотин [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. № 251. С. 245—259.
22. Аспекты исследования взаимодействия гусеничного движителя вездеходных машин со слабонесущим почвогрунтом / О. Н. Бурмистрова, Ю. М. Чемшикова, И. В. Григорьев [и др.] // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 1. С. 29—62.
23. Влияние скорости движения лесовозного автопоезда на величину возникающих напряжений в дорожной конструкции / В. А. Борисов, Д. В. Акинин, В. В. Кирей [и др.] // Resources and Technology. 2018. Т. 15, № 3. С. 43—51.
24. Математические модели взаимодействия движителей машин с грунтами / Е. Г. Хитров, А. В. Андронов, А. М. Хахина [и др.] // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 4. С. 15—64.
25. Комплексная оценка взаимодействия движителей машин с лесными грунтами на базе методов теории движения транспорта в условиях бездорожья / Е. Г. Хитров, А. В. Андронов, А. М. Хахина [и др.] // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 1—52.
26. Исследование взаимосвязей свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин / Е. Г. Хитров, А. А. Просужих, С. Е. Рудов [и др.] // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 2. С. 45—79.
27. Савенкова Н. В. Учёт физико-механических свойств материала дорожной одежды при приведении лесовозных автотранспортных средств к расчётной нагрузке // Лесотехнический журнал. 2019. № 3. С. 96—102.
28. Обоснование необходимости исследования воздействия валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах / А. А. Кривошеев, А. С. Швецов, О. Н. Бурмистрова [и др.] // Resources and Technology. 2024. Т. 21, № 4. С. 66—120.
29. Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек / В. Е. Божбов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов [и др.] // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 2. С. 13—35.
30. Оценка технологических свойств оттаивающих почвогрунтов под нагрузкой от лесной машины и трелёвочной системы на склонах / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 256—270.
31. Дмитриева М. Н., Григорьев И. В., Рудов С. Е. Анализ исследований взаимодействия колёсного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 1. С. 10—39.

32. *Гаврилов Т. А., Хорошилов К. В., Колесников Г. Н.* Сезонное промерзание лесовозной грунтовой дороги: моделирование условий появления поперечных трещин // *Resources and Technology*. 2018. Т. 15, № 3. С. 29—42.
33. Функционирование временных лесовозных дорог в зимний и межсезонный периоды (на примере Республики Карелия) / *К. В. Хорошилов, В. К. Катаров, Т. А. Гаврилов [и др.]* // *Resources and Technology*. 2019. Т. 16, № 2. С. 59—75.
34. Оценка несущей способности грунта зимней лесовозной дороги с различной глубиной промерзания / *А. П. Мохирев, М. Т. Исламова, О. Н. Бурмистрова [и др.]* // *Resources and Technology*. 2025. Т. 22, № 3. С. 203—218.
35. *Сюнёв В. С., Катаров В. К., Ратькова Е. И.* Воздействие циклов «замораживание — оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии // *Resources and Technology*. 2013. Т. 10, № 1. С. 73—89.
36. *Бурмистрова О. Н., Бургонутдинов А. М., Пильник Ю. Н.* Механизм образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах, эксплуатируемых в умеренно-континентальном климате // *Лесотехнический журнал*. 2016. № 4. С. 133—138.
37. Особенности районов строительства лесовозных автомобильных дорог / *Р. С. Сапелкин, В. Э. Меерсон, М. В. Меерсон [и др.]* // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 3. С. 30—43.
38. *Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В.* Исследование влияния температуры мёрзлого почвогрунта на его свойства // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17, № 3. С. 50—96.
39. *Кручинин И. Н., Бурмистрова О. Н.* Нормирование основных транспортно-эксплуатационных качеств зимних лесовозных автомобильных дорог // *Лесотехнический журнал*. 2017. № 4. С. 134—140.
40. *Кручинин И. Н., Сушков С. И., Данилов В. В.* Возможности повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог в различных сезонных условиях Свердловской области // *Лесотехнический журнал*. 2018. № 4. С. 157—163.
41. Формирование модели проектирования системы «дорожные условия — транспортные потоки» и пути её реализации / *В. Г. Козлов, А. В. Скрыпников, Е. Ю. Микова [и др.]* // *Лесотехнический журнал*. 2018. № 1. С. 100—111.
42. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды / *В. Г. Козлов, А. В. Скрыпников, Р. В. Могутов [и др.]* // *Лесотехнический журнал*. 2018. № 2. С. 156—168.
43. Методика последовательного анализа и определения стандартов отклонений от проектных параметров лесовозных автомобильных дорог / *П. В. Тихомиров, А. В. Скрыпников, В. Г. Козлов [и др.]* // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 3. С. 69—82.
44. Анализ современных методов изыскания лесовозных автомобильных дорог / *П. В. Тихомиров, А. В. Скрыпников, Е. В. Чернышова [и др.]* // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023. № 242. С. 179—188.
45. *Бурмистрова О. Н., Пильник Ю. Н.* Разработка методической базы процесса создания сетевых математических моделей транспортно-технологических потоков лесоматериалов // *Лесотехнический журнал*. 2016. № 2. С. 63—68.
46. *Пильник Ю. Н., Сушков С. И., Бурмистрова О. Н.* Разработка модели планирования оптимального использования лесовозного транспорта по сети автомобильных дорог // *Лесотехнический журнал*. 2016. № 3. С. 73—78.

47. Мохирев А. П., Герасимова М. М. Совершенствование технологического процесса заготовки и вывозки древесины с использованием информационных технологий // Лесотехнический журнал. 2019. № 4. С. 90—98.
48. Влияние природно-производственных факторов на транспортные затраты лесозаготовительного производства / А. П. Мохирев, М. О. Позднякова, Т. С. Гудень [и др.] // Лесотехнический журнал. 2019. № 2. С. 107—117.
49. Мохирев А. П., Герасимова М. М., Позднякова М. О. Анализ структуры затрат на транспортировку древесины и их сезонной динамики // Лесотехнический журнал. 2020. № 2. С. 123—133.
50. Исследование деформационных характеристик фиброцементогрунтовых конструкций лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов, Е. Г. Васильев, Н. В. Ладейщиков [и др.] // Resources and Technology. 2024. Т. 21, № 3. С. 1—16.
51. Чудинов С. А. Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги // Resources and Technology. 2024. Т. 21, № 2. С. 1—14.
52. Чудинов С. А. Оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. № 249. С. 230—243.
53. Кручинин И. Н. Обоснование применения каменных материалов при строительстве оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог // Лесотехнический журнал. 2016. № 2. С. 84—90.
54. Кручинин И. Н., Ращектаев В. А. Повышение технологической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из низкопрочных каменных материалов // Лесотехнический журнал. 2018. № 2. С. 168—176.
55. Нгуен В. Л. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных покрытий путём армирования георешётками во Вьетнаме // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: Материалы VII Всерос. научно-практ. конф. (с междунар. участием). Омск: СиБАДИ, 2012. Кн. 1. С. 124—128.
56. Руденский А. В. Выбоины на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог. Причины их возникновения и меры по предотвращению // Дороги и мосты. 2017. № 2 (38). С. 9.
57. Корольков Р. А., Данько В. П., Корневский В. В. Анализ причин колееобразования на асфальтобетонном покрытии проезжей части улиц г. Краснодара // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2024. № 3. С. 26—35.
58. Дормидонтова Т. В., Куликова О. А. Причины образования колеиности на автомобильных дорогах // Актуальные исследования. 2023. № 3. С. 26—35.
59. Клыбик Д. В. Причины образования трещин на асфальтобетонных покрытиях и их влияние на состояние дорожной одежды // Транспортные сооружения: Материалы 80-й Студенческой научно-технической конференции, апрель — май 2024 г. Минск: БНТУ, 2024. С. 450—452.
60. Сушков С. И., Сергеев А. С. Алгоритм образования трещин на покрытии лесовозных дорог, устраиваемых на склоне, в основании которых залегает глинистый грунт // Лесотехнический журнал. 2017. № 1. С. 118—126.
61. Темкин И. О., Антонов М. О. Распознавание и отслеживание дефектов дорожного полотна в реальном времени на основе комплексного использования стандартных вычислительных процедур и глубоких нейронных сетей // Программные продукты и системы. 2024. № 3. С. 421—430.

62. Чудинов С. А., Карабутова И. А. Нейронечёткая сеть для расчёта стоимости строительства лесовозной дороги из фиброцементогрунта // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 154—162.
63. Нейронечёткая сеть для оценки технологических решений устройства лесных дорог / В. В. Побединский, С. И. Булдаков, А. В. Берстнев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2020. № 3. С. 95—103.
64. Caliskan E., Sevim Y. Forest road detection using deep learning models // Geocarto International. 2022. Vol. 37, no. 20. P. 5875—5890.

References

1. Official Internet Portal of the Republic of Karelia. Available at: <http://www.gov.karelia.ru/Leader/Document/Les/a02.html>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
2. Trofimova N. V., Sazykina M. Yu., Mamleeva E. R. Forest industry complex development in Russian Federation regions. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 118—126. (In Russ.)
3. Strategy for the Development of the Forestry Complex of the Russian Federation for the Period up to 2030. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573658653?marker=65A0IQ>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
4. Karjalainen T., Leinonen T., Gerasimov Y., Husso M., Karvinen S. *Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia: final report of the research project. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. Joensuu, Metla, 2009, vol. 110. 151 p.
5. Burmistrova O. N. *Improving the Reliability and Efficiency of Timber Roads in the North-Western Region: Doctoral Dissertation in Technical Sciences*. Voronezh, 2006. 392 p. (In Russ.)
6. Petrov A. N., Stepanov A. V. Assessment of the Quality of Timber Road Maintenance. *Improving the Efficiency of the Forestry Complex in the Republic of Karelia: Proceedings of the Third Republican Scientific and Practical Conference for Young Scientists, Postgraduate Students, and Doctoral Candidates*. Petrozavodsk, 2012, pp. 33—35. (In Russ.)
7. Stepanov A. V., Gruzdev A. V. Experimental assessment of the condition of Karelia roads exposed to the active logging transport traffic. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 160—173. (In Russ.)
8. Afonina M. I., Perevozchikov B. F., Seliverstov V. A. *Roads and Bridges. Biological Methods of Slope Strengthening and Land Reclamation in Road Construction*. Moscow, Informavtodor, 2007, no. 5. (In Russ.)
9. Bavbel E. I., Lyshchik P. A. Justification of the Placement of Timber Transport Networks. *Russian Forestry Journal*, 2009, no. 4, pp. 82—88. (In Russ.)
10. Katarov V. K., Rozhin D. V., Siounev V. S. Optimal planning of a forest road network: from methods to solutions. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 32—47. (In Russ.)
11. Gerasimov Y., Karvinen S., Siounev V., Sokolov A., Katarov V. Development of wood transport infrastructure — Finnish experience. *Transport Business in Russia*, 2009, no. 7, pp. 99—102. (In Russ.)
12. Shegelman I. R. *Forest Industry and Forestry: A Dictionary*. Petrozavodsk, PetrSU Publishing House, 2008. 278 p. (In Russ.)
13. Shegelman I. R., Shchegoleva L. V., Lukashevich L. V. Substantiation of forest roads operating period. *Russian Forestry Journal*, 2007, no. 2, pp. 54—57. (In Russ.)

14. Siounev V. S., Sokolov A. P., Konovalov A. P. *Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia. Joensuu: Research Institute of Forests of Finland, 2008.* 126 p. (In Russ.)
15. Pitukhin A. V., Petrov A. N. Calculation of road structures of logging roads. *Transport Business of Russia*, 2011, no. 1 (86), pp. 120—123. (In Russ.)
16. Petrov A. N. Increase in operational reliability of road pavements. Experience of forest management in the conditions of the North-West of the Russian Federation and Fennoscandia: *materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the Forestry Engineering Department of PetrSU.* Petrozavodsk, 2011, pp. 27—28. (In Russ.)
17. Pitukhin A. V., Petrov A. N., Markov V. I., Stepanov A. V. Reliability function estimation method of the timber road section due to road coating fatigue wear. *Transport Business in Russia*, 2013, no. 2 (105), pp. 15—18. (In Russ.)
18. Khoroshilov K. V., Katarov V. K., Gavrilov T. A. Strength and elastic modulus of frozen sandy soil as a material for a logging road. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 33—43. (In Russ.)
19. Mokhirev A. P., Servatinsky V. V., Dudin P. O., Sorokina M. N., Mokhirev I. A., Sokolova A. R. Analysis of factors affecting the bearing capacity of a principal-type paved highway. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 114—128. (In Russ.)
20. Petrosyan S. S., Otmakhov D. V., Alekseenko V. G., Revyako S. I., Egorin A. A., Khitrov E. G. Model of rut formation on a linear strengthening soil under a periodic load. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2022, no. 238, pp. 88—98. (In Russ.)
21. Andronov A. V., Taradin G. S., Bolotin D. V., Nikonov V. S., Igotti M. M., Petrosyan S. S., Bozhbov V. E. Mathematical models of strengthening ground compaction for rutting estimation eliminated in elementary functions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2024, no. 251, pp. 245—259. (In Russ.)
22. Burmistrova O. N., Chemshikova Yu. M., Grigoriev I. V., Rudov S. E., Kunitskaya O. A. Aspects of research into the interaction of the crawler drive of all-terrain vehicles with weak soil. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 29—62. (In Russ.)
23. Borisov V. A., Akinin D. V., Kirey V. V., Fokina E. A. Influence of the timber truck speed on the stress in the road structure. *Resources and Technology*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 43—51. (In Russ.)
24. Khitrov E. G., Andronov A. V., Khakhina A. M., Grigoriev G. V. Mathematical models of machine movers' interaction with soils. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 15—64. (In Russ.)
25. Khitrov E. G., Andronov A. V., Khakhina A. M., Grigoriev G. V. Assessment of vehicles interaction with forest soils based on the methods of the theory of off-the-road locomotion. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 1—52. (In Russ.)
26. Khitrov E. G., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigoriev I. V. Research of interrelations of soil properties as supporting surfaces for forest machinery movement. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 45—79. (In Russ.)
27. Savenkova N. V. Description of physical and mechanical properties of pavement material when reducing forestry motor vehicles to calculated load. *Forestry Engineering Journal*, 2019, no. 3, pp. 96—102. (In Russ.)
28. Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Burmistrova O. N., Grigoriev I. V., Revyako S. I., Okhlopkova M. K. Substantiation of the need to study the impact of felling-skidding-processing machines on the soils of cutting areas on the slopes. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 4, pp. 66—120. (In Russ.)

29. Bozhkov V. E., Grigoriev I. V., Rudov S. E., Teterleva E. V., Chemshikova Yu. M. Analysis of approaches to the description of processes of interaction of the propulsion of forest machines with the soil on the cutting area. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 13—35. (In Russ.)
30. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Assessment of technological properties of thawing soils under load from a forest machine and a skidding system on slopes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2024, iss. 249, pp. 256—270. (In Russ.)
31. Dmitrieva M. N., Grigoriev I. V., Rudov S. E. Interaction of wheeled forestry machines with non-cohesive soil. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 10—39. (In Russ.)
32. Gavrilov T. A., Khoroshilov K. V., Kolesnikov G. N. Seasonal Freezing of a Logging Dirt Road: Modeling of Conditions of Transverse Cracks Emergence. *Resources and Technology*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 29—42. (In Russ.)
33. Khoroshilov K. V., Katarov V. K., Gavrilov T. A., Kolesnikov G. N. Functioning of temporary logging roads in winter and off-season periods (a case of the Republic of Karelia). *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 59—75. (In Russ.)
34. Mohirev A. P., Islamova M. T., Burmistrova O. N., Kruchinin I. N., Otev K. S. Assessment of the bearing capacity of winter logging road subgrade with different freezing depths. *Resources and Technology*, 2025, vol. 22, no. 3, pp. 203—218. (In Russ.)
35. Siounev V. S., Katarov V. K., Ratkova E. I. Deformation properties of forest soils in Karelia affected by «freeze-defrost» cycles. *Resources and Technology*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 73—89. (In Russ.)
36. Burmistrova O. N., Burgonutdinov A. M., Pilnik Yu. N. The mechanism of frost cracks formation on the motor roads operated in the temperate continental climate. *Forestry Engineering Journal*, 2016, no. 4, pp. 133—138. (In Russ.)
37. Sapelkin R. S., Meerson V. E., Meerson M. V., Skrypnikov A. V., Kazachek M. N. Features of regions for forest roads construction. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 30—43. (In Russ.)
38. Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigoriev I. V. Study of the influence of frozen soil temperature on its properties. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 50—96. (In Russ.)
39. Kruchinin I. N., Burmistrova O. N. Rationing of basic transport and operational qualities of the winter covers of logging roads. *Forestry Engineering Journal*, 2017, no. 4, pp. 134—140. (In Russ.)
40. Kruchinin I. N., Sushkov S. I., Danilov V. V. Opportunities for Improving the Transport and Operational Qualities of Timber Roads in Various Seasonal Conditions of the Sverdlovsk Region. *Forestry Engineering Journal*, 2018, no. 4, pp. 157—163. (In Russ.)
41. Kozlov V. G., Skrypnikov A. V., Mikova E. Yu., Mogutnov R. V., Chirkov E. V. Formation of the model of designing the system «road conditions — transport flows» and ways of its implementation. *Forestry Engineering Journal*, 2018, no. 1, pp. 100—111. (In Russ.)
42. Kozlov V. G., Skrypnikov A. V., Mogutnov R. V., Mikova E. Yu., Zelikova Yu. A. Comprehensive experimental research of changing parameters and characteristics of road conditions, transport flows and motion modes under influence of climate and weather. *Forestry Engineering Journal*, 2018, no. 2, pp. 156—168. (In Russ.)
43. Tikhomirov P. V., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Tveritnev O. N., Grigoriev I. V. The method of sequential analysis and determination of standards of deviations from the design parameters of logging roads. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 69—82. (In Russ.)

44. Tikhomirov P. V., Skrypnikov A. V., Chernyshova E. V., Bondarev A. B., Kazachek M. N., Bryukhovetsky A. N. Analysis of modern methods of surveying logging roads. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii*, 2023, no. 242, pp. 179—188. (In Russ.)
45. Burmistrova O. N., Pilnik Yu. N. Development of a Methodological Framework for Creating Network Mathematical Models of Transport and Technological Flows of Timber. *Forestry Engineering Journal*, 2016, no. 2, pp. 63—68. (In Russ.)
46. Pilnik Yu. N., Sushkov S. I., Burmistrova O. N. Development of a model for planning the optimal use of logging transport on a network of highways. *Forestry Engineering Journal*, 2016, no. 3, pp. 73—78. (In Russ.)
47. Mokhirev A. P., Gerasimova M. M. Improvement of the technological process of logging and transportation of wood using information technologies. *Forestry Engineering Journal*, 2019, no. 4, pp. 90—98. (In Russ.)
48. Mokhirev A. P., Pozdnyakova M. O., Guden T. S., Suhinin V. D. Influence of natural and industrial factors on the transport costs of forestry production industry. *Forestry Engineering Journal*, 2019, no. 2, pp. 107—117. (In Russ.)
49. Mokhirev A. P., Gerasimova M. M., Pozdnyakova M. O. Analysis of the cost structure of timber transportation and their seasonal dynamics. *Forestry Engineering Journal*, 2020, no. 2, pp. 123—133. (In Russ.)
50. Chudinov S. A., Vasilyev E. G., Ladeyshchikov N. V., Ladeyshchikov K. V. Study of Deformation Characteristics of Fiber Cement-Soil Structures of Logging Road. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 1—16. (In Russ.)
51. Chudinov S. A. Study of the Strength Gain of Fiber Cement-modified Soil in the Logging Road Pavement. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 1—14. (In Russ.)
52. Chudinov S. A. Assessment of the technical and economic efficiency of the construction of logging roads made of fiber cement soil. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii*, 2024, no. 249, pp. 230—243. (In Russ.)
53. Kruchinin I. N. Justification of stone in construction materials bases and covers logging roads. *Forestry Engineering Journal*, 2016, no. 2, pp. 84—90. (In Russ.)
54. Kruchinin I. N., Rashchektaev V. A. Increasing technological efficiency of forestry roads construction from low strength stone materials. *Forestry Engineering Journal*, 2018, no. 2, pp. 168—176. (In Russ.)
55. Nguyen V. L. Improving the crack resistance of asphalt concrete pavements by reinforcing them with geogrids in Vietnam. *Development of the road transport complex and construction infrastructure based on rational environmental management*. Omsk, SibADI, 2012, book 1, pp. 124—128. (In Russ.)
56. Rudensky A. V. Potholes on Asphalt Concrete Road Surfaces. Causes and Prevention *Measures*. *Roads and Bridges*, 2017, no. 2 (38), p. 9. (In Russ.)
57. Korolkov R. A., Danko V. P., Korenevski V. V. Analysis of the causes of rutting on the asphalt concrete pavement of the streets of Krasnodar. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*, 2024, no. 3, pp. 26—35. (In Russ.)
58. Dormidontova T. V., Kulikova O. A. Causes of Potholes Formation on Roads. *Current Research*, 2023, no. 3, pp. 26—35. (In Russ.)
59. Klyubik D. V. Causes of cracks formation on asphalt concrete pavements and their influence on the condition of road clothing. *Transport structures: materials of the 80th Student scientific and technical conference, April — May 2024*. Minsk, BNTU, 2024, pp. 450—452. (In Russ.)
60. Sushkov S. I., Sergeev A. S. The algorithm of formation of cracks on the logging roads surface arranged on the slope, overlain by clayey soil at the base. *Forestry Engineering Journal*, 2017, no. 1, pp. 118—126. (In Russ.)

61. Temkin I. O., Antonov M. O. Real-time recognition and tracking of road surface defects based on complex using of standard computational procedures and deep neural networks. *Software Products and Systems*, 2024, no. 3, pp. 421—430. (In Russ.)
62. Chudinov S. A., Karabutova I. A. Neuro-fuzzy network for calculating the cost of constructing a logging road made of fiber cement soil. *Systems. Methods. Technologies*, 2024, no. 1 (61), pp. 154—162. (In Russ.)
63. Pobedinsky V. V., Buldakov S. I., Berstenev A. V., Anastas E. S. Neural fuzzy network for assessing technological solutions for forest roads. *Forestry Engineering Journal*, 2020, no. 3, pp. 95—103. (In Russ.)
64. Caliskan E., Sevim Y. Forest road detection using deep learning models. *Geocarto International*, 2022, vol. 37, no. 20, pp. 5875—5890.

© Катаров В. К., Марков В. И., Ратькова Е. И., Степанов А. В., Сюнёв В. С., 2026