

Совершенствование методов мониторинга транспортно-эксплуатационного состояния лесных дорог с использованием цифровых технологий

С.В. Ченушкина^{1a}, И.Н. Кручинин^{1b}, Э.Р. Ахтямов^{2c}, А.Г. Гороховский^{1d}, Е.Е. Шишкина^{1e}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² ООО УралНИИстром, ул. Сталеваров, 5, Челябинск, Россия

^a svch2003@yandex.ru, ^b Kinaa.k@yandex.ru, ^c ra@7359808.ru, ^d goralegr@yandex.ru, ^e elenashishkina@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7768-4223>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>, ^c <https://orcid.org/0009-0007-6563-8696>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

Статья поступила 24.05.2023, принята 04.09.2023

В статье исследовано состояние цифровой трансформации лесного хозяйства, описываются термины, перспективность и необходимость уточнения подходов к существующим бизнес-процессам с внедрением цифровых технологий и инвестирования в процесс цифровой трансформации. Приведены преимущества цифровых технологий для лесозаготовительной отрасли в виде снижения бумажного документооборота, повышения эффективности производства и снижения временных затрат на согласование, при этом отмечается необходимость обучения кадров и наличие материально-технической базы. Рассмотрены методы мониторинга транспортно-эксплуатационного состояния лесотранспортных путей. Было показано, что, в соответствии с действующими нормативно-техническими требованиями, в качестве критерия следует использовать прочность дорожных конструкций, ширину проезжей части, поперечную ровность дорожных покрытий (колеиность). Оценка прочности дорожной одежды проводится по динамическому модулю упругости. Оценка поперечной ровности дорожного покрытия лесной дороги оценивается по величине глубины колеи, оценка ширины проезжей части лесной дороги — по результатам дистанционного зондирования, оценка интенсивности движения лесовозного подвижного состава — по величине грузовой работы. При этом следует учитывать разрозненность использования цифровых технологий и низкий уровень технического обеспечения при мониторинге лесных дорог. Разработана многоуровневая структурная схема информационной системы мониторинга лесных дорог. Результатом статьи стало описание подсистем мониторинга и их сопряжение с Единой государственной автоматизированной информационной системой учета древесины и сделок с ней (ЛесЕГАИС). Впервые была проведена настройка системы по данным опытно-производственных участков лесотранспортных сетей Челябинской и Свердловской областей, а также Пермского края. Статья имеет практическую значимость для специалистов в области лесозаготовительного и лесного хозяйства РФ.

Ключевые слова: лесные дороги; цифровые технологии; лесотранспортная инфраструктура; распределенные реестры; транспортно-эксплуатационное состояние дороги.

Improving methods for monitoring the transport and operational condition of forest roads in the summer and winter seasons using digital technologies

S.V. Chenushkina^{1a}, I.N. Kruchinin^{1b}, E.R. Akhtyamov^{2c}, A.G. Gorokhovskiy^{1d}, E.E. Shishkina^{1e}

¹ Ural State Forestry Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia

² UralNIISTrom LLC; 5, Stalevarov St., Chelyabinsk, Russia

^a svch2003@yandex.ru, ^b Kinaa.k@yandex.ru, ^c ra@7359808.ru, ^d goralegr@yandex.ru, ^e elenashishkina@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7768-4223>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>, ^c <https://orcid.org/0009-0007-6563-8696>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

Received 24.05.2023, accepted 04.09.2023

The article examines the state of digital transformation of forestry, describes the terms, the perspectives and the need to clarify approaches to existing business processes with the introduction of digital technologies and investment in the digital transformation process. The advantages of digital technologies for the logging industry in the form of reducing paperwork, increasing production efficiency and reducing the time spent on approval are given, while the need for staff training and the availability of a material and technical base are noted. Methods for monitoring the transport and operational state of forest transport routes are considered. It is shown that in accordance with the current regulatory and technical requirements, the following should be used as a criterion: the strength of road structures, the width of the carriageway, the transverse evenness of road surfaces (rutting). The evaluation of the pavement strength is carried out according to the dynamic modulus of elasticity. The evaluation of the transverse evenness of the pavement of a forest road is estimated by the depth of the rut. Estimation of the width of the carriageway of the forest road is based on the results of remote sensing. Assessment of

the traffic intensity of timber rolling stock is done by the magnitude of cargo work. At the same time, the fragmentation of the use of digital technologies and the low level of technical support in monitoring forest roads should be taken into account. A multi-level block diagram of the forest road monitoring information system has been developed. The article provides a description of the monitoring subsystems, and their interface with the Unified State Automated Information System for accounting for wood and transactions with it (LesEGAIS). For the first time, the system is configured according to the data of experimental production sections of forest transport networks of the Chelyabinsk and Sverdlovsk regions, as well as the Perm Territory. The article is of practical importance for specialists in the field of logging and forestry of the Russian Federation.

Keywords: forest roads; digital technologies; forest transport infrastructure; distributed registries; transport and operational state of the road.

Введение. Лесной комплекс России представляет собой обширную территорию с разнообразными лесными экосистемами. Россия является одной из стран с самым большим лесным фондом в мире и имеет огромное лесное наследие. Общая площадь лесов в России огромна и составляет около 809 млн га [1]. Леса покрывают более половины территории страны и расположены в различных экологических зонах, от тайги и лесостепи до смешанных и лиственных лесов, и занимают важную роль в лесохозяйственной деятельности. В стране ведутся лесозаготовительная и лесовосстановительная деятельность, производство древесины, добываются древесные ресурсы и осуществляется охрана лесов.

При этом в последние годы увеличивается интенсивность различных угроз и вызовов — лесные пожары, незаконная рубка, несанкционированное строительство, изменение климата и деградация почв. В 2022 г. площадь лесных пожаров составила 3,5 млн га, в 2023 г. есть тенденция к ухудшению состояния.

Поэтому для устойчивого управления лесными ресурсами и различными видами лесохозяйственной деятельности важное значение имеют наличие и эксплуатационное состояние лесных дорог [2]:

1. Для обеспечения доступности к удаленным лесным участкам, что позволит проводить лесозаготовку, пожаротушение, задачи по охране леса и другие виды деятельности;

2. В оптимизации логистики и повышения экономической эффективности лесозаготовительной деятельности, при которой лесотранспортная инфраструктура является основным инструментом для лесовозных перевозок, позволяющих доставить древесину и другие лесоматериалы к местам переработки или экспорта;

3. В обеспечении пожарной безопасности. Лесные дороги служат важным средством для борьбы с лесными пожарами. Они создают преграду для распространения огня и облегчают доступ пожарных служб к очагам пожаров. Лесные дороги также позволяют проводить профилактические мероприятия, такие как создание противопожарных полос, и контрольные обследования;

4. При проведении научных и исследовательских работ. Для сбора данных, мониторинга экосистем, изучения растительности и животного мира, а также для проведения экспериментов и обследований;

5. В экологическом управлении. Лесные дороги играют роль в управлении лесными экосистемами. Они могут использоваться для установления зон отвода, контроля доступа и регулирования человеческой деятельности в лесах. Это помогает сохранять уязвимые участки, защищать биоразнообразие и обеспечивать устойчивое использование лесных ресурсов;

6. Туризм и рекреация. Лесные дороги являются основой для развития туризма и рекреации в лесных районах. Они предоставляют доступ к природным достопримечательностям, пешеходным и велосипедным тропам, местам для пикников и кемпинга. Лесные дороги способствуют развитию экотуризма и природного отдыха, что является источником дохода для местных сообществ и способствует сохранению природных ценностей.

Активное использование лесных дорог, особенно в областях с высокой лесопромышленной деятельностью, частые перевозки тяжелых грузов, таких как древесина и лесоматериалы, вызывают износ и повреждения покрытия дорог. Также они подвержены воздействию различных природно-климатических воздействий, таких как атмосферные осадки, снегопады, заморозки и таяние снега. Эти факторы могут вызывать эрозию, смывать покрытие дороги и создавать ямы и провалы, что вызывает риски при дальнейшей эксплуатации для решения обозначенных задач.

Зачастую проблемы эксплуатации вызваны недостаточностью планирования и управления развитием лесотранспортной инфраструктуры, несоответствием лесных дорог интенсивности использования, отсутствием альтернативных маршрутов и недостаточным объемом мер по предотвращению повреждений. Отсутствие планового ремонта, отсроченное обслуживание и неподходящие методы строительства приводят к появлению дефектов дорожных покрытий, земляного полотна и искусственных сооружений.

Возникает необходимость мониторинга состояния лесных дорог, который поможет выявить потенциально опасные участки, повреждения и препятствия на дорогах [3].

В условиях цифровой трансформации лесного хозяйства одним из ключевых моментов является внедрение информационных системы и технологических решений [4–7]. Для более полного и точного мониторинга лесных дорог и их состояния могут быть задействованы следующие решения и технологии:

1. Дистанционное зондирование и спутниковая навигация. Спутниковые снимки и глобальные позиционные системы (GPS) могут использоваться для наблюдения за состоянием лесных дорог. Спутниковые снимки позволяют обнаружить изменения в лесной обстановке, такие как лесные пожары, вырубки и деградация дорог. GPS-навигация помогает определить местоположение и маршруты дорог для точного мониторинга.

2. Дроны и беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Дроны обладают возможностью осуществлять аэрофотосъемку и видеозапись лесных дорог, что позво-

ляет получить подробные и актуальные данные о состоянии дорожной инфраструктуры. Дроны также могут использоваться для быстрого обнаружения повреждений, опасных участков или случаев неправильного использования дорог.

3. Сенсорные сети и Интернет вещей (IoT). Установка сенсорных устройств на лесных дорогах позволяет собирать данные о различных параметрах, таких как температура, влажность, давление, загрузка и движение. Эти данные могут быть использованы для оценки состояния дорог, прогнозирования неисправностей, контроля нагрузки и определения оптимальных временных интервалов для проведения обслуживания и ремонта [8–10].

4. Геоинформационные системы (ГИС). Используются для сбора, хранения, анализа и визуализации пространственных данных о лесных дорогах. С помощью ГИС можно создать цифровую картографическую модель, включающую дорожную инфраструктуру, ландшафтные особенности и другие важные параметры. Это позволяет анализировать изменения, планировать маршруты, определять оптимальные пункты обслуживания и принимать решения на основе этих данных [11].

5. Информационные реестры, мобильные приложения и системы управления [12–17]. Разработка мобильных приложений и систем управления позволяет в реальном времени получать данные о состоянии лесных дорог и принимать оперативные решения.

Комбинация одних из обозначенных технологий позволит повысить эффективность управления и организации транспортной доступности за счет мониторинга эксплуатационного состояния лесных дорог [18].

Анализ эксплуатационного состояния производился в соответствии с основными требованиями свода правил 288.1325800.2016, который устанавливает требования к проектированию, строительству и эксплуатации лесных дорог. Данный стандарт разработан для обеспечения безопасности, устойчивости и эффективности использования лесных дорог [18].

В наших исследованиях было обосновано, что для оценки текущего состояния лесотранспортной инфраструктуры следует знать основные транспортно-эксплуатационные показатели лесных дорог [3; 18; 19].

Транспортно-эксплуатационные показатели лесных дорог — это набор характеристик, которые оценивают эффективность использования лесных дорог для транспортировки лесоматериалов и выполнения лесозаготовительных и лесохозяйственных мероприятий.

В соответствии с действующими нормативно-техническими требованиями выбраны следующие основные критерии: прочность дорожных конструкций, ширина проезжей части и поперечная ровность дорожного покрытия (уровень глубины колеи) [2; 19].

Прочность дорожных конструкций лесных дорог — это способность дорожного покрытия и всех конструктивных элементов дороги выдерживать нагрузки, возникающие в результате движения лесотранспортных средств, а также воздействия окружающей среды, включая погодные условия.

Прочность дорожных конструкций на лесных дорогах зависит от нескольких факторов:

1. Грунтовые условия. Качество грунта, на котором

строится дорога, играет важную роль в определении ее прочности. Различные типы грунтов могут иметь разную несущую способность, стабильность и устойчивость к нагрузкам.

2. Проектирование дороги. Корректное проектирование дороги, учитывающее предполагаемую нагрузку и условия эксплуатации, способствует созданию прочной конструкции. Это включает правильное распределение слоев дорожного покрытия, обеспечение отвода воды и устойчивости откосов.

3. Конструкционные дорожно-строительные материалы. Использование подходящих материалов для строительства дороги также влияет на ее прочность. Чаще всего применяются материалы, такие как щебень, гравий, асфальтобетонные смеси, цемент или их комбинации, в зависимости от требований и условий местности.

4. Уровень эксплуатации и ремонта. Регулярное обслуживание и ремонт дорожных конструкций являются неотъемлемой частью поддержания их требуемого транспортно-эксплуатационного состояния. Своевременное устранение трещин, ремонт выбоин и поддержание правильного дренажа помогают снизить эксплуатационное разрушение дорожного покрытия.

5. Нагрузки и интенсивность движения. Прочность дороги также зависит от типа транспорта, который будет использоваться на ней, и интенсивности движения. Значительный объем грузовой работы или тяжелые лесовозы могут создавать большую нагрузку на дорогу, и ее конструкция должна быть спроектирована с учетом этого.

В качестве основных показателей следует принять грузоподъемность как способность дорожного покрытия выдерживать нагрузку от лесотранспортных средств без деформаций и повреждений; устойчивость к динамическим нагрузкам; сопротивление воздействию окружающей среды. Исследование данных показателей позволит увеличить эффективность оборота лесосырьевых баз. Для оценки прочности дорожных конструкций лесных дорог используются нагрузочные испытания, визуальные осмотры и анализ данных о прошлых исследованиях.

Другим немаловажным показателем является оценка поперечной ровности дорожного покрытия лесной дороги (колейность). Колейность является одним из показателей поперечной ровности и отражает продольные впадины и выпуклости, образующиеся на поверхности дороги вдоль ее ширины.

В условиях лесных дорог замер колейности может быть осуществлен разными устройствами; в полевых условиях, например, рейкой РДУ-Кондор, представленной на рис. 1. Рейка РДУ-Кондор, также известная как планировочная рейка, является частью оборудования РДУ-Кондор, используемого при строительстве, ремонте и диагностике автомобильных дорог по ГОСТ 32825-2014. Рейка представляет собой устройство, которое крепится к передней части РДУ-Кондора и выполняет функцию планировки дорожного покрытия.

Рейка РДУ-Кондор имеет регулируемые высоту и наклон, что позволяет контролировать и корректировать уровень дорожного покрытия. Она оснащена специальными острыми лезвиями, или кромками, которые позволяют снимать неровности и выравнивать поверхность

дороги. Во время работы рейку РДУ-Кондор перемещают по дороге, при этом рейка сканирует поверхность и удаляет неровности, выравнивая покрытие.



Рис. 1. Замер глубины колеи с использованием рейки РДУ-Кондор

Более точные измерения колеи можно провести с использованием профилометра — это специальное оборудование, которое используется для измерения вертикальных отклонений поверхности дороги или других объектов. Он позволяет получить информацию о поперечной и продольной ровности, колеи, шероховатости и других параметрах дорожного покрытия.

Профилометры могут иметь различные конструкции и принципы работы. Одним из наиболее распространенных типов профилометров является лазерный профилометр. Он использует лазерный луч для сканирования поверхности и измерения высоты в разных точках. Полученные данные обрабатываются и анализируются с помощью программного обеспечения, что позволяет определить параметры поперечной ровности и другие характеристики дороги. В условиях лесной дороги его использование возможно при условии использования подвижной станции.

Для работы лазерного профилометра применяются различные математические методы. Вот некоторые из них:

1. Триангуляция. Этот метод основан на измерении угла между лазерным лучом и плоскостью детектора. Используя треугольник, образованный лучом, поверхностью объекта и детектором, можно вычислить расстояние от лазерного профилометра до точки на поверхности объекта. Таким образом, по мере перемещения лазерного профилометра по поверхности объекта получается трехмерное изображение профиля.

2. Фазовый сдвиг. Этот метод используется для измерения высоты поверхности объекта путем анализа фазового сдвига лазерного излучения. Путем измерения разности фаз между отраженным и исходным лазерным излучением можно определить высоту точки на поверхности объекта.

3. Метод времени пролета. Этот метод основан на измерении времени, которое требуется лазерному лучу для отражения от поверхности объекта и возвращения обратно к детектору. Путем учета скорости света и времени пролета лазерного луча можно определить расстояние до точки на поверхности объекта.

4. Волновая интерферометрия. Этот метод использует принцип интерференции волн для измерения высоты поверхности объекта. Лазерное излучение

разделяется на две волны, которые распространяются по разным путям и вновь объединяются. Путем измерения разности фаз между объединенными волнами можно определить высоту поверхности.

Оценка колеи обычно выполняется с помощью специальных математических алгоритмов, которые обрабатывают данные, полученные от профилометра. Показатели колеи могут быть представлены числовыми значениями, которые позволяют сравнивать разные участки дороги и определять их уровень поперечной ровности.

Для оценки колеи поверхности с помощью данных, полученных от профилометра, может быть применено несколько математических алгоритмов. Вот некоторые из них [20–23]:

Алгоритм наименьших квадратов (*Least Squares Method*). Этот метод позволяет аппроксимировать полученные профили поверхности с использованием кривой или функции. После аппроксимации кривой к профилю можно вычислить отклонение каждой точки от этой кривой. Далее, на основе этих отклонений можно определить колею поверхности.

Анализ Фурье (*Fourier Analysis*). Анализ Фурье позволяет разложить профиль поверхности на гармонические составляющие различных частот. После разложения можно определить амплитуды и фазы каждой гармонической составляющей. Отсюда можно сделать выводы о колеи поверхности. Формулы для этого метода связаны с применением преобразования Фурье и обработкой его результатов.

Фильтрация и сглаживание данных. В некоторых случаях для оценки колеи поверхности применяется фильтрация и сглаживание данных, чтобы удалить шумы и нежелательные колебания. Применение различных фильтров, таких как фильтр низких или высоких частот, может помочь получить более точную оценку колеи. Формулы для фильтрации зависят от выбранного метода фильтрации, например, используя оконные функции или цифровые фильтры.

Алгоритм автоматизации вычисления колеи поверхности может состоять из следующих шагов:

Этап 1. Загрузка данных. Получение данных профиля поверхности от лазерного профилометра. Эти данные представляют собой измерения высоты точек поверхности вдоль определенной оси.

Этап 2. Предварительная обработка. Производится предварительная обработка данных для удаления шумов, выбросов или других артефактов, которые могут исказить результаты. Могут применяться фильтрация или сглаживание данных.

Этап 3. Разделение на сегменты. Поверхность разделяется на отдельные сегменты или участки в соответствии с определенными критериями, например, физическими особенностями поверхности или длиной сегмента.

Этап 4. Аппроксимация кривыми. Каждый сегмент аппроксимируется кривой или функцией. Это может быть достигнуто, например, с помощью метода наименьших квадратов.

Этап 5. Оценка колеи. Используя аппроксимированные кривые, производится вычисление отклонения каждой точки от кривой в пределах каждого

сегмента. Эти отклонения могут представлять колеи-ность поверхности.

Этап 6. Визуализация и анализ результатов. Результаты вычисления колеиности могут быть визуализированы, например, в виде графиков или цветовой карты. Также можно провести дополнительный анализ и статистическую обработку результатов.

Когда речь идет о состоянии поверхности дорог с твердым или уплотненным покрытием, измеряемыми переменными, как правило, являются различные типы трещин, выбоин, изломов кромок, шероховатостей и колеиности, полученной за счет измерения рейкой РДУ-Кондор или профилометром.

Результаты. В общем случае оценка транспортно-эксплуатационного состояния лесотранспортной инфраструктуры должна удовлетворять экологическим, экономическим и техническим критериям. В качестве основных показателей выбраны оценка прочности дорожной одежды лесной дороги (динамический модуль упругости дорожного покрытия); оценка поперечной ровности дорожного покрытия лесной дороги (колеиность); оценка ширины проезжей части лесной дороги; оценка интенсивности движения лесовозного подвижного состава (грузовая работа лесной дороги).

В рамках данного исследования предполагается ежегодно собирать данные о состоянии лесных дорог, и интервал сбора данных на одном и том же участке дороги будет варьироваться в зависимости от важности дороги для лесного хозяйства.

Пространственное расстояние за счет измерения между точками измерения в рамках границ арендованных участков и длин агрегированных переменных варьируется в зависимости от переменной, планируется сохранение информации о состоянии в информационном реестре данных состояния дорог, переменных, описывающих состояние поверхности, используются на сетевом уровне планирование и рассчитано в среднем на участки дорог длиной до 100 м [3].

Общая структурная схема информационной системы мониторинга с учетом выбранных критериев представлена на рис. 2. Таким образом, система должна рассчитывать оценку состояния с учетом результатов отдельных параметров, таких как прочность, колеиность, ширина и грузооборот, с учетом требований и вычислением результирующего обобщенного показателя. F — подсистема оценки показателя прочности дорожной одежды лесной дороги; Rut — подсистема оценки показателя поперечной ровности дорожного покрытия лесной дороги; W — подсистема оценки показателя ширины проезжей части лесной дороги; Q — подсистема оценки грузооборота лесной дороги.

На представленное решение мониторинга состояния лесных дорог получено свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [24].

За счет использования автоматизации расчета модуля появилась возможность прогнозирования состояния. Объясняющими переменными являются номер участка, номер дороги, участок дороги, номер проезжей части, направление съёмки, полоса движения, начальное расстояние сегмента от начала дороги, начальный показатель, промежуточные показатели за период времени, текущий показатель и возможное ухудшение состояния участка дороги, вычисляемое за счет использования теории Марковских цепей или метода наименьших квадратов регрессии опорных векторов.

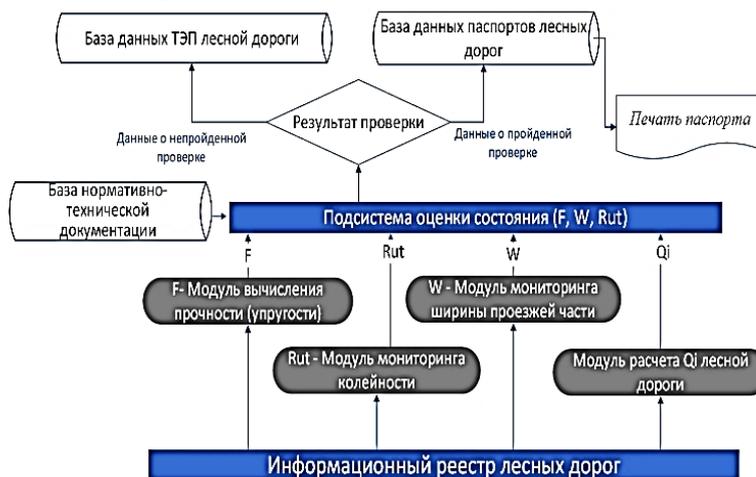


Рис. 2. Общая структурная схема информационной системы мониторинга лесных дорог

Рассмотрим более подробно реализацию подсистем. Структурная схема вычисления колеиности лесной дороги представлена на рис. 3. Подсистема колеиности была реализована по алгоритмам вычисления с использованием рейки РДУ-Кондор по внутренней колее и по внешней колее, и с помощью профилометра.

Были проведены обследования состояния лесной дороги с измерением глубины колеи в разное время. Дата проведения обоих обследований известна, но дата определения возможного исследования колеиности неизвестна. Идея состоит в том, чтобы спрогнозировать значения колеиности γ по внешней и внутренней колее в момент времени $t + k$. N объясняющие переменные включают в себя переменные, не зависящие от времени, прошлые значения условий и временную информацию, которые обозначим через x^i в момент времени t [27]. Прогнозируемые значения получаются с помощью функции f с учетом погрешности e по следующему выражению:

$$\gamma_{t+k} = f\left(\sum_{i=1}^n x_t^i\right) + e_{t+k} \quad (1)$$

Модуль расчета колеиности был реализован как часть информационной системы с использованием языка программирования РНР. На рис. 4 приведен пример программного кода на РНР для оценки колеиности дорожного покрытия с использованием базы данных, полученной при обследовании дорожного покрытия методом наименьших квадратов.

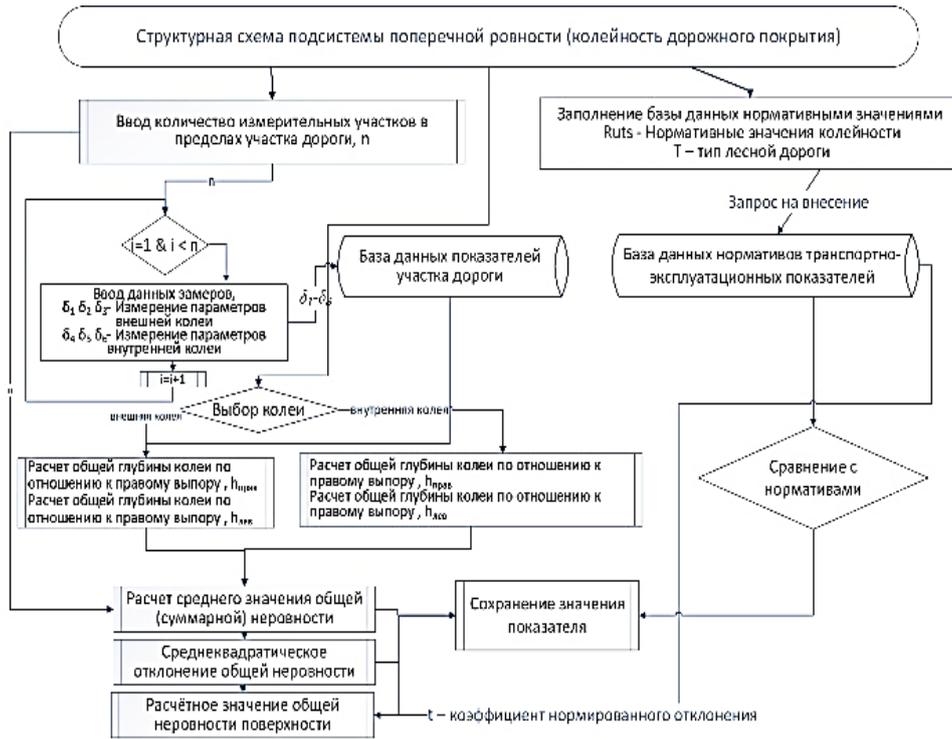


Рис. 3. Структурная схема вычисления колеиности

```

<?php
// Пример данных профиля поверхности
$profileData = array(
    array('x' => 1, 'y' => 3),
    array('x' => 2, 'y' => 5),
    array('x' => 3, 'y' => 4),
    array('x' => 4, 'y' => 6),
    array('x' => 5, 'y' => 8)
);
// Функция для оценки колеиности поверхности методом наименьших квадратов
function estimateProfileRoughness($profileData) {
    $n = count($profileData);
    $sumX = 0;
    $sumY = 0;
    $sumXY = 0;
    $sumX2 = 0;
    // Вычисление сумм
    foreach ($profileData as $point) {
        $sumX += $point['x'];
        $sumY += $point['y'];
        $sumXY += ($point['x'] * $point['y']);
        $sumX2 += ($point['x'] * $point['x']);
    }
    // Вычисление коэффициентов линейной регрессии (метод наименьших квадратов)
    $slope = ($n * $sumXY - $sumX * $sumY) / ($n * $sumX2 - $sumX * $sumX);
    $intercept = ($sumY - $slope * $sumX) / $n;

    // Возвращаем коэффициент колеиности
    return $slope;
}

// Вызов функции для оценки колеиности
$roughness = estimateProfileRoughness($profileData);

// Вывод результата
echo "Колейность поверхности: " . $roughness;
?>
    
```

Рис. 4. Пример программного кода подсистемы определения колеиности дорожного покрытия

В приведенном примере используется линейная регрессия для аппроксимации профиля поверхности методом наименьших квадратов. Результатом является коэффициент наклона линии, который является оценкой колеиности поверхности. Для работы с реестром код был изменен для импорта данных из реестра за предыдущие периоды. На рис. 5 представлен рабочий момент оценки показателя поперечной ровности (колеиности) дорожных покрытий.

На представленное решение оценки колеиности также было получено свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [25].



Рис. 5. Показатель поперечной ровности (колеиности) дорожных покрытий

Аналогично построены подпрограммы оценки показателя прочности дорожной одежды лесной дороги, оценки показателя ширины проезжей части лесной дороги и оценки грузооборота лесной дороги.

Для настройки всей информационной системы в качестве пилотного проекта были отобраны участки лесо-транспортной сети, находящиеся на территориях Челябинской, Свердловской областей и Пермского края. На

рис. 6 представлен пример оценки эффективности функционирования лесотранспортной инфраструктуры (опытно-экспериментальный участок лесной дороги с покрытием переходного типа. Карпинский ЛПК, филиал ООО «Ураллеспром»).

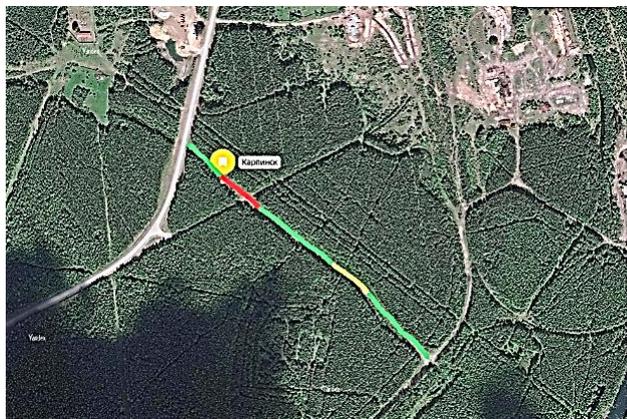


Рис. 6. Пример оценки транспортно-эксплуатационного состояния лесной дороги с использованием информационной системы мониторинга: желтый — транспортно-эксплуатационное состояние не обеспечено, но не превышает предельно допустимых значений; зеленый — обеспечено; красный — не обеспечено

Таким образом, после проведения мониторинга в программной части формируется вывод о состоянии лесотранспортной сети с соответствующей подсветкой на схеме, где красный цвет показывает неудовлетворительное состояние для движения лесовозного транспорта.

Заключение. В результате проведенных исследований была разработана методика мониторинга транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры, отличающаяся возможностью использования цифровых технологий. Разработанная информационная система мониторинга состояния лесотранспортной инфраструктуры позволила осуществлять ее сопряжение с Единой государственной автоматизированной информационной системой учета древесины и сделок с ней (ЛесЕГАИС) [26; 27]. Существующие распределенные реестры и государственные информационные системы недостаточно доступны или содержат ошибочные, устаревшие сведения, или невозможен обмен данными ввиду межведомственной несогласованности.

Было выяснено, что не все технологии оценки транспортно-эксплуатационного состояния следует применять при мониторинге лесотранспортной инфраструктуры. Например, применение лазерных профилометров целесообразно только на лесных дорогах с грузооборотом не менее 350 тыс. т/год. В то же время, создание цифрового реестра лесотранспортной сети с веб-интерфейсом и GPS-позиционированием позволило усовершенствовать процесс мониторинга транспортных показателей лесных дорог. Разработанный прототип расположен в электронной информационной образовательной системе на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: <https://lroad.lms-usfeu.ru> (фрагмент представлен на рис. 7).

ЦИФРОВОЙ РЕЕСТР ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

← РЕЕСТР ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО "Уральский государственный лесотехнический университет"
Кафедры Транспорта и дорожного строительства и Интеллектуальных систем
в рамках диссертационного исследования Ченушкиной Светланы Владимировны (рук. д.т.н Кручинин Игорь Николаевич),
формируется реестр транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры

Единый информационный реестр транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной сетевой инфраструктуры (далее также - реестр) представляет собой информационный ресурс и содержит сведения о лесотранспортной сети и ее эксплуатационное состояние независимо от их форм собственности и значения.

1. Формирование и ведение реестра осуществляются на примере мониторинга участка лесотранспортной сети Свердловской области, на основании данных учета лесных дорог.
2. Ведение реестра осуществляется на путем внесения данных в информационную систему.
3. В реестр вносятся ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ о лесотранспортной сети:
 - сведения о собственнике, арендаторе, владельце участка леса и дороги;
 - наименование ближайших автомобильных дорог общего пользования или федерального значения;
 - идентификационный номер лесной дороги включающий специальную кодировку;
 - протяженность лесной дороги и используемых на платной основе ее участков;
 - координаты участка лесотранспортной сети для экспертизы;
 - иные сведения.
4. В реестр вносятся ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ лесотранспортной сети:

Рис. 7. Веб-интерфейс реализованного цифрового реестра, расположенного по адресу: <https://lroad.lms-usfeu.ru>

В рамках исследования в реестр были занесены данные и технические показатели 30-ти участков лесных дорог и лесотранспортных сетей, расположенных на территориях Челябинской, Свердловской области и Пермского края. Важнейшим ожидаемым эффектом от

использования информационной системы стало увеличение межремонтных сроков при эксплуатации лесных дорог и снижение экологической нагрузки на лесную среду за счет рационального перераспределения маршрутов движения лесного сырья.

Литература

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 20 сент. 2018 г. № 1989-р / Минприрод, Минпромторг России, Россельхоз. М., 2018. 46 с.
2. Ильин Б.А., Кувалдин Б.И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог. М.: Лесная пром-сть, 1982. 384 с.
3. Ченушкина С.В., Кручинин И.Н. 3D-моделирование лесотранспортной сети в условиях цифровой трансформации лесного хозяйства // Тенденции развития науки и образования. Т. 88. № 3. С. 158-160.
4. Развитие цифровой экономики в России. Программа до 2035 года. URL: <http://innclub.info/wp-content/uploads/2017/05/strategy> (дата обращения: 10.10.2022).
5. Проект 12 ноября 2019 г. Концепции создания и функционирования в Российской Федерации отраслевой цифровой платформы «Цифровой лес». URL: <http://www.freedocs.xyz/docx-525953349> (дата обращения: 10.10.2022).
6. О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы: указ Президента РФ от 09.05.2017 г. № 203. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216363/ (дата обращения 10.10.2022).
7. Власенко В.Н., Широбоков А.С. Цифровизация государственного экологического управления: правовые аспекты // RUDN Journal of Law. 2021. V. 25. № 2. P. 601-619.
8. Mariam H. Ismail, Mohamed Khater, Mohamed Zaki. Digital Business Transformation and Strategy: What Do We Know So Far? Cambridge Service Alliance, 2017.
9. Valentini R., Marchesini B. L., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V., Castaldi S. New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0. Annals of Silvicultural Researches. 2019. V. 43. № 2.
10. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond // Procedia CIRP. 2016. № 52. P. 173-178.
11. Вагизов М.Р. Прикладные аспекты развития геоинформационного обеспечения лесного хозяйства // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право: сб. ст. СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2019. Вып. 3 (35). С. 173-175.
12. Daniel Schallmo, Christofer A. Williams, Luke Boardman. Digital Transformation of Business Models - Best Practice, Enablers, and Roadmap // XXVIII ISPIM Innovation Conference - Composing the Innovation Symphony, Austria, Vienna on 18-21 June. Vienna, 2018.
13. Jugulum R., Gray D.H. Competing with high quality data: concept, tools and techniques for building a successful approach to data quality. New York, 2014. 304 p.
14. Scholz R.W., Czichos R., Parycek P., Lampoltshammer T.J. Organizational vulnerability of digital threats: a first validation of an assessment method // European Journal of Operational Research. 2020. № 282 (2). P. 627-643.
15. Barenfanger R., Otto B., Gizanis D. Business and data management capabilities for digital economy. White paper, 2015.
16. Earley S. DAMA-DMBOK: Data Management Body of Knowledge. New Jersey, 2017.
17. Гнездилова Ю.С. Робототехника как элемент четвертой промышленной революции и перспективы развития робототехники в России // Международная экономика. 2019. № 6. С. 46-57.
18. Кручинин И.Н., Шакирзянов Д.И. Информационное обеспечение технологии строительства дорожных покрытий лесных дорог применительно к условиям республики КОМИ // Цифровые технологии в лесном секторе: материалы Всерос. науч.-технической конф. (26-27 марта 2020 г.). СПб: Политех-пресс, 2020. С. 169-171.
19. 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 (32). С. 157-163.
20. Borkowski A., Krzysztofik I. (2015). Application of Least Squares Method for the Assessment of Road Surface Evenness. Procedia Engineering, 108. P. 142-150.
21. Chen H., Jia Z., Yu G. (2019). Road Roughness Evaluation Based on Least Squares Support Vector Machine with Regularization Parameter Optimization. Mathematical Problems in Engineering, 2019. P. 3580576.
22. Museros P., Sales J. (2017). Optimization of Road Roughness Assessment Using Least Squares Support Vector Regression // International Journal of Engineering and Technology (IJET), 9 (3). P. 2165-2173.
23. Peng Z., Du Y., Wang Y., Wang W. (2018). Road Roughness Assessment Using Least Squares Support Vector Machine Optimized by the Fruit Fly Optimization Algorithm. Mathematical Problems in Engineering, 2018. P. 2327684.
24. Ченушкина С.В., Кручинин И.Н., Ахтямов Э.Р. Информационный реестр транспортно-эксплуатационного состояния лесных автомобильных дорог: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU № 2023621133. 2023.
25. Ченушкина С.В., Кручинин И.Н. Модуль цифрового прототипа показателя поперечной ровности (колейность дорожного покрытия): свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU № 2023617530. 2023.
26. О создании федеральной государственной информационной системы лесного комплекса: приказ Рослесхоза от 22.04.2021 N 372 // Доступ из справ. правовой системы «Консультант Плюс».
27. Единая государственная автоматизированная информационная система учета древесины и сделок с ней. URL: <https://lesegais.ru> (дата обращения: 15.09.2023).

References

1. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 20 sent. 2018 g. № 1989-r / Minprirod, Minpromtorg Rossii, Rossel'hoz. M., 2018. 46 p.
2. Il'in B.A., Kuvaldin B.I. Design, construction and operation of logging roads. M.: Lesnaya prom-st', 1982. 384 p.
3. Chenushkina S.V., Kruchinin I.N. 3D modeling of the forest transportation network in the conditions of digital transformation of forestry // Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. V. 88. № 3. P. 158-160.
4. Development of the digital economy in Russia. The program until 2035. URL: <http://innclub.info/wp-content/uploads/2017/05/strategy> (data obrashcheniya: 10.10.2022).
5. Proekt 12 noyabrya 2019 g. Concepts of creation and functioning of the digital industry platform "Digital Forest" in the Russian Federation. URL: <http://www.freedocs.xyz/docx-525953349> (data obrashcheniya: 10.10.2022).
6. On the Strategy for the development of the Information Society in the Russian Federation for 2017-2030": ukaz Prezidenta RF ot 09.05.2017 g. № 203. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216363/ (data obrashcheniya 10.10.2022).
7. Vlasenko V.N., SHirobokov A.S. Digitalization of state environmental management: legal aspects // RUDN Journal of Law. 2021. V. 25. № 2. P. 601-619.
8. Mariam H. Ismail, Mohamed Khater, Mohamed Zaki. Digital Business Transformation and Strategy: What Do We Know So Far? Cambridge Service Alliance, 2017.
9. Valentini R., Marchesini B. L., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V., Castaldi S. New tree monitoring systems:

- from Industry 4.0 to Nature 4.0. *Annals of Silvicultural Researches*. 2019. V. 43. № 2.
10. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond // *Procedia CIRP*. 2016. № 52. P. 173-178.
 11. Vagizov M.R. Applied aspects of the development of geoinformation support of forestry // *Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo: sb. st. SPb.: OOO «Andreevskij izdatel'skij dom», 2019. Vyp. 3 (35). P. 173-175.*
 12. Daniel Schallmo, Christofer A. Williams, Luke Boardman. Digital Transformation of Business Models - Best Practice, Enablers, and Roadmap // XXVIII ISPIM Innovation Conference - Composing the Innovation Symphony, Austria, Vienna on 18-21 June. Vienna, 2018.
 13. Jugulum R., Gray D.H. Competing with high quality data: concept, tools and techniques for building a successful approach to data quality. New York, 2014. 304 p.
 14. Scholz R.W., Czichos R., Parycek P., Lampoltshammer T.J. Organizational vulnerability of digital threats: a first validation of an assessment method // *European Journal of Operational Research*. 2020. № 282 (2). P. 627-643.
 15. Barenfanger R., Otto B., Gizanis D. Business and data management capabilities for digital economy. White paper, 2015.
 16. Earley S. DAMA-DMBOK: Data Management Body of Knowledge. New Jersey, 2017.
 17. Gnezdilova YU.S. Robotics as an element of the fourth industrial revolution and prospects for the development of robotics in Russia // *The World Economics*. 2019. № 6. P. 46-57.
 18. Kruchinin I.N., SHakirzyanov D.I. Information support of the technology of construction of road surfaces of forest roads in relation to the conditions of the KOMI Republic // *Cifrovye tekhnologii v lesnom sektore: materialy Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. (26-27 marta 2020 g.)*. SPb: Politekhpress, 2020. P. 169-171.
 19. Kruchinin I.N., Sushkov S.I., Danilov V.V. Possibilities of improving the transport and operational qualities of logging roads in different seasonal conditions of the Sverdlovsk region // *Forestry Engineering Journal*. 2018. № 4 (32). P. 157-163.
 20. Borkowski A., Krzysztofik I. (2015). Application of Least Squares Method for the Assessment of Road Surface Evenness. *Procedia Engineering*, 108. P. 142-150.
 21. Chen H., Jia Z., Yu G. (2019). Road Roughness Evaluation Based on Least Squares Support Vector Machine with Regularization Parameter Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. P. 3580576.
 22. Museros P., Sales J. (2017). Optimization of Road Roughness Assessment Using Least Squares Support Vector Regression // *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 9 (3). P. 2165-2173.
 23. Peng Z., Du Y., Wang Y., Wang W. (2018). Road Roughness Assessment Using Least Squares Support Vector Machine Optimized by the Fruit Fly Optimization Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. P. 2327684.
 24. CHenushkina S.V., Kruchinin I.N., Ahtyamov E.R. Information register of the transport and operational condition of forest roads: svidetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM RU № 2023621133. 2023.
 25. CHenushkina S.V., Kruchinin I.N. Module of the digital prototype of the transverse evenness indicator (road surface gauge): svidetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM RU № 2023617530. 2023.
 26. On the creation of the federal state information system of the forest complex: prikaz Rosleskhoza ot 22.04.2021 N 372 // Dostup iz sprav. pravovoj sistemy «Konsul'tant Plyus».
 27. Unified state automated information system for wood accounting and transactions with it. URL: <https://lesegais.ru> (data obrashcheniya: 15.09.2023).