

ISBN 978-83-975865-0-5

Transport Problems 2025

Conference proceedings

UNDER THE HONORARY
PATRONAGE OF



Silesian
University
of Technology



Krajowa
Reprezentacja
Doktorantów

KRD



XVII INTERNATIONAL
SCIENTIFIC
CONFERENCE

25-27.06 2025

Katowice - Wisła- Żilina

23-24.06.2025
Katowice-Mysłowice

XIV INTERNATIONAL
SYMPOSIUM OF YOUNG
RESEARCHERS

Dedicated to the 80th
anniversary of the
Silesian University of Technology



Silesian University of Technology
Faculty of Transport and Aviation Engineering

Transport Problems 2025

Dedicated to the 80th anniversary
of the Silesian University of Technology

Proceedings

XVII International Scientific Conference

XIV International Symposium of Young Researchers

UNDER THE HONORARY PATRONAGE OF



Silesian University
of Technology



Krajowa
Reprezentacja
Doktorantów

KRD

ISBN 978-83-975865-0-5

Media patronage:
Transport Problems International Scientific Journal
ISSN 1896-0596, The Silesian University of Technology,
Faculty of Transport and Aviation Engineering

Transport Problems
International Scientific Journal

editor-in-chief

A. Sładkowski

editorial board

P. Czech, M. Cieśla, T. Haniszewski,

M. Juzek, W. Kamiński, M. L. Tumminello, G. Wojnar

- **CONFERENCE - TABLE OF CONTENTS**
- **CONFERENCE - AUTHORS LIST**
- **CONFERENCE - PRESENTATIONS**
- **SYMPOSIUM - TABLE OF CONTENTS**
- **SYMPOSIUM - AUTHORS LIST**
- **SYMPOSIUM - PRESENTATIONS**
- **CONFERENCE & SYMPOSIUM**
PROCEEDINGS
- **CONFERENCE & SYMPOSIUM PROGRAM**

No.	Author, title	Pages	
		Begin	End
61	Michał PAŁĘGA, Mariusz SALWIN, Tomasz CHMIELEWSKI, Dariusz MASŁOWSKI Professional driver occupational risk assessment - challenges and threats to the development of road transport	654	668
62	Abelimo PASSOLI, Coffi AHOLOU Urban sprawl and accessibility in downtown Lomé: mobility issues and socio-spatial inequalities	669	684
63	Piotr PAWLAK, Kamila GAŚIOREK Statistical assessment of the number of vertical road signs in Poland in the context of creating a representative database of Polish traffic signs for implementing autonomous vehicles	685	694
64	Patryk PAWLIKOWSKI, Rafał WACHNIK, Adam MAŃKA, Jonasz STASZEK Tool for analyzing the passage of a train with specific technical parameters on a railway line	695	704
65	Jan PEČMAN, Branislav ŠARKAN, Lenka LIŽBETINOVÁ The impact of road infrastructure on fuel consumption and emissions of a road vehicle – a case study	705	716
66	Velizara PENCHEVA, Asen ASENOV, Aleksandar GEORGIEV, Kremena MINEVA, Mladen KULEV System of key performance indicators for monitoring the effectiveness of urban public transport	717	731
67	Bartłomiej ROMOWICZ, Maciej SZKODA Design and testing of the propulsion system of a prototype electric vehicle intended for people with disabilities	732	745
68	Aleksandr ŠABANOVIČ, Jonas MATIJOŠIUS, Darius VAINORIUS, Aleksandras CHLEBNIKOVAS, Artūras KILIKIČIUS, Vytautas RIMŠA Experimental study on particulate matter dynamics in inclined ducts mimicking marine exhaust systems	746	753
69	Zoia SAZANISHVILI, Serhii ALEKSIEIENKO, Valerii NEKRASOV Icing conditions for small unmanned aerial vehicles	754	764
70	Aman SHAKENOV, Aleksander ŚLADKOWSKI, Assem UTEGENOVA, Ivan STOLPOVSKIKH Цифровой мониторинг состояния внутрикарьерных технологических дорог в условиях угольного месторождения	765	780

Ключевые слова: внутрикарьерные технологические дороги, цифровой мониторинг, экспериментальные замеры, тестирование, оценка технического состояния

Aman SHAKENOV*

Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev
Satbayeva 22, 050013 Almaty, Kazakhstan

Aleksander ŚLADKOWSKI

Silesian University of Technology, Faculty of Transport and Aviation Engineering
Kraśnińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

Assem UTEGENOVA, Ivan STOLPOVSKIKH

Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev
Satbayeva 22, 050013 Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author. E-mail: ashakenov@yahoo.com

ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ВНУТРИКАРЬЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. Транспортирование горной массы является основным фактором затрат при открытой добыче полезных ископаемых, охватывающим как обслуживание внутрикарьерных технологических дорог, так и эксплуатацию автосамосвалов. Высокая значимость оптимизации работы карьерного транспорта подтверждается ведущей долей затрат на него в общей себестоимости добычи полезного ископаемого. Актуальное направление оптимизации — это разработка и внедрение цифровых технологий обработки данных о состоянии внутрикарьерных технологических дорог. Решение указанных вопросов должно базироваться на результатах научно-исследовательских работ по сбору и обработке информации о эксплуатационно-техническом состоянии автосамосвалов и карьерных дорог. В этом исследовании тестируются одновременно три различных современных метода цифрового мониторинга, такие как: беспилотные летательные аппараты (БПЛА); «VIMS System» и «Racelogic VBOX», позволяющие выполнять экспериментальные замеры параметров работы карьерных автосамосвалов как в рамках специальных единичных экспериментов, так и в виде длительных мониторинговых замеров. Приведены данные экспериментальных замеров по установлению состояния двух участков внутрикарьерных технологических дорог на разрезе Восточный, Экибастузского угольного месторождения. При исследованиях оценивалось влияние дефектов карьерных дорог на рабочие параметры 130-тонных автосамосвалов типа CAT 785 C от Caterpillar, включая регистрацию размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвалов при их движении от дефектов дорог, превышающих регламентированные значения заводов-изготовителей. Представлены рекомендации по повышению эффективности эксплуатации внутрикарьерных технологических дорог.

1. АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время ученые и исследователи пытаются найти лучшую комбинацию из нескольких методов цифрового мониторинга состояния внутрикарьерных технологических дорог, которая может использовать преимущества разных способов. Развитие карьерного автомобильного транспорта связано с интенсивным ростом единичной мощности и стоимости машин, их габаритов и массы, чем и продиктована необходимость в определении оптимальных

параметров его эксплуатации. Поскольку нельзя оценивать эффективность применения автомобильного транспорта, не рассматривая его зависимость от таких показателей, как долговечность металлоконструкций автосамосвалов, расходов топлива, ходимости шин, объемов текущих и капитальных ремонтов дорожного покрытия и других, то с учетом этих обстоятельств выполнен анализ результатов предшествующих исследований, на которых базируется предлагаемая работа.

В ранее выполненных исследованиях авторы утверждают, что улучшение состояния внутрикарьерных дорог может положительно повлиять на работу карьерного транспорта, это повышению производительности, безопасности, увеличению срока службы шин и снижению затрат на техническое обслуживание автосамосвалов и ремонт дорог. По этим причинам для обеспечения эксплуатационной эффективности внутрикарьерных технологических дорог требуются программы цифрового мониторинга.

Исследованиям проблем повышения эффективности работы большегрузных автомобилей на карьерных дорогах посвящены исследования ряда ученых и инженеров многих стран. Так в работе [1-3] рассмотрены особенности влияния неровностей карьерных дорог на эксплуатацию карьерного транспорта в горнодобывающей отрасли. В этом исследовании использовалось современное лазерное профилирование для установления состояния карьерных дорог в двух крупных бразильских шахтах. Установлено, что увеличение неровности покрытия дороги может привести к значительному снижению средней скорости движения, заметному увеличению времени в пути, снижению производительности и соответственно увеличению транспортных расходов. Одним из основных недостатков такого способа мониторинга является высокая начальная стоимость приобретения лазерного сканирующего оборудования и программного обеспечения. Это требует значительных инвестиций, особенно для небольших горных предприятий.

В настоящее время исследователи прибегают ко многим передовым измерительным системам и методам для обнаружения неровностей карьерных дорог. Например, в работе [4-6] предлагается обнаружение неровностей дороги по данным ИМУ (инерциальных измерительных устройств), основываясь на идее, что неровности дороги генерируют неровности сигналов от датчиков, местоположения и величины неровностей дороги. Использование ИМУ продолжает быть востребованной и развивающейся областью в дорожной диагностике и автономных транспортных системах, однако информация может быть устаревшей, особенно в контексте быстро развивающихся технологий обработки сигналов и сенсорных систем.

В исследовании [7-9] предлагается относительно новый инновационный способ оценки неровностей дорог путем регистрации вибрации автосамосвалов, вызванных плохими условиями карьерных дорог, которые создают множество негативных последствий для горных предприятий. Результаты этого исследования показывают, что локализованные уровни вибрации могут использоваться для объективного определения неровных дорог, что делает метод применимым в реальных эксплуатационных условиях. Регистрация телеметрических данных транспортных средств в основном используется для диспетчеризации парка транспортных средств, предотвращения столкновений и геологической съемки, однако как отмечают авторы, телеметрические данные еще не нашли широкого применения в диспетчеризации технического обслуживания карьерных дорог. Вибрационные данные могут искажаться из-за различий в загрузке автосамосвалов, их технического состояния или скорости движения. Исследователи предлагают продолжить полномасштабное тестирование с использованием данных всего парка с более длительным периодом времени.

Многие транспортные системы карьеров с большими протяженностями внутрикарьерных дорог не могут достаточно часто регистрировать состояние всей дорожной сети, чтобы адекватно определять состояние дороги для принятия обоснованных решений по профилактическому обслуживанию. Для решения этой проблемы были проведены исследования по разработке недорогих технологий на основе смартфонов, устанавливаемых внутри транспортных средств для измерения состояния дороги.

Авторы исследования [10] отмечают, что алгоритмы машинного обучения при соответствующем обучении смогли надежно оценить неровность дороги по целочисленной

шкале оценок на уровне детализации, который подходит для стратегического управления дорожными активами, при условии, что учитываются тип и скорость транспортного средства, а также тип смартфона. Использование смартфона делает метод дешевым и легко масштабируемым, без необходимости в специализированном оборудовании и может использоваться дорожными службами в рамках краудсорсинга от водителей карьерных автосамосвалов. Однако по сравнению с профессиональными приборами акселерометры смартфонов могут быть менее чувствительными и подвержены шумам, а высокая вариативность моделей смартфонов, расположение их в автосамосвале и стиль вождения, усложняют стандартизацию регистрируемых данных из-за разницы в аппаратном и программном обеспечении между смартфонами. При обработке полученных данных возникает необходимость разработки алгоритмов фильтрации, нормализации и синхронизации, что увеличивает сложность анализа.

Неровности карьерных дорог являются ключевым фактором, влияющим на возникновение динамических нагрузок на металлоконструкции автосамосвалов. Чтобы регулировать параметры скорости движения автосамосвалов в соответствии с неровностью дороги, методы измерения неровностей в реальном режиме времени становятся новыми актуальными направлениями исследований. Так в статье [13, 14] представлены показатели и стандарты для оценки неровности дороги, как с помощью прямого измерения, так и с помощью косвенной идентификации. Среди них выделены методы непрямой идентификации неровности дороги, которые классифицируются на распознавание на основе лазерного датчика, распознавание на основе модели вибрации и распознавание на основе нейронной сети.

Статья сфокусирована на специфике горнодобывающей отрасли, где качество карьерных дорог, критично для эффективности и безопасности. Авторы отмечают, что лазерный профилировщик стоит дорого и легко подвергается помехам из-за природных факторов, таких как пыль на дорогах и не подходит для длительного использования. В дополнение к лазерному методу распознавания неровностей дорожного покрытия, также возможно установить датчик вибрации, чтобы получить смещения и ускорения автосамосвала. Возбуждение транспортного средства, в свою очередь, определяет неровность дороги. Однако этот метод требует большего количества датчиков, менее точен в реальном режиме времени, чем метод лазерной идентификации. Метод на основе нейронной сети имеет более низкую стоимость и более высокую точность при определении дефектов дорожного покрытия и диапазонов уклонов дороги. В перспективе метод распознавания, основанный на глубоком обучении и обучении с подкреплением, также станет приоритетным направлением исследований.

Для оценки состояния внутрикарьерных технологических дорог и принятия обоснованных решений по повышению производительности, безопасности, увеличению срока службы шин и снижению затрат на техническое обслуживание требуются программы мониторинга. В настоящее время для сбора данных и принятия решений в горнодобывающей промышленности все более популярным становятся новые технологии с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [15, 16]. Результаты этих исследований показывают, что аэрофотоснимки и цифровые модели рельефа можно использовать для оценки состояния ровности карьерных дорог и проверки соответствия конструкции дороги. Аэрофотосъемка позволяет обнаруживать поверхностную воду, разливы горных пород и выбоины на дороге, которые могут быть быстро отремонтированы, устранены специальной группой по обслуживанию дорог, что имеет практическое значение для улучшения безопасности и эффективности транспортных работ [17-19].

Использование методов БПЛА позволяет регистрировать данные с высокой точностью и с минимальными затратами времени, что является значительным преимуществом по сравнению с традиционными методами [20, 21]. Применение новых технологий в горной промышленности, демонстрирует потенциал инноваций для улучшения мониторинга и оценки состояния внутрикарьерных технологических дорог. Авторы отмечают, что несмотря на все преимущества использование БПЛА для мониторинга может быть затруднено в условиях плохой погоды или сложных рельефов карьерных дорог, что ограничивает его применение в различных климатических и экологических условиях [22-24]. К тому же их внедрение требует значительных

инвестиций в оборудование и обучение персонала, что может быть нецелесообразным для небольших или стартовых горнодобывающих предприятий. Авторы приводят примеры обработки данных, визуализации и оценки состояния дорог, что делает исследования полезными для практиков, однако в статьях недостаточно полно приводятся рекомендации о долгосрочной эффективности и надежности применения БПЛА, что требует дополнительных исследований для подтверждения долгосрочной стабильности такой технологии [25-27].

Анализ работ, вышеупомянутых в настоящем обзоре, показывает, что вопросы, связанные с исследованием и обоснованием эффективных методов мониторинга и оценки состояния внутрикарьерных технологических дорог в карьерах, к настоящему времени изучены достаточно широко и незначительное число работ посвящено вопросам оптимизации отдельных параметров дорог. Вместе с тем, следует отметить, что результаты выполненных исследований в большей степени основываются на краткосрочных или частных данных, это может ограничивать возможность для анализа долгосрочных эффектов применения предложенных методов мониторинга. Недостаточно полно рассмотрены альтернативные методы или существующие решения, что ограничивает понимание, насколько новые методы мониторинга превосходят существующие подходы [28-30].

По результатам анализа выполненных исследований можно сделать вывод о том, что несмотря на значительный прогресс в решении проблемы совершенствования методов и средств по установлению состояния постоянных внутрикарьерных технологических дорог, остается еще много нерешенных вопросов, связанных с проведением глубокого мониторинга состояния внутрикарьерных дорог с автомобильным транспортом, маршруты движения которого не являются постоянными при открытой добыче полезных ископаемых. Поэтому сохраняется необходимость своевременного выявления параметров дефектов дорог, более глубокого анализа параметров с учетом интегрального их отрицательного влияния на долговечность и эффективность работы автосамосвалов, ходимости шин, обеспечения безопасности движения, а также на снижение динамических нагрузок на транспортные средства. В связи с этим, одним из эффективных решений проблемы совершенствования внутрикарьерных технологических дорог является дальнейшее проведение исследований, направленных на разработку и внедрение комплексной системы мониторинга технологических дорог в условиях угольных месторождений. Это позволит повысить безопасность транспортных операций, снизить эксплуатационные расходы и продлить срок службы карьерного автотранспорта.

2. ВВЕДЕНИЕ

Экибастузское угольное месторождение является одним из крупнейших угольных бассейнов Республики Казахстан и обладает стратегическим значением для энергетического сектора страны. Разработка месторождения обеспечивает значительную долю угольной продукции, используемой в теплоэнергетике и промышленности Казахстана. Добыча угля в данном регионе ведется открытым способом, что требует эффективного управления карьерными дорогами для повышения производительности и снижения эксплуатационных затрат.

В настоящем исследовании изучается опыт мониторинга технологических дорог в разрезах «Богатырь» и «Восточный» Экибастузского угольного месторождения. Качество карьерных дорог напрямую влияет на безопасность, экономическую эффективность и долговечность карьерной техники. При исследованиях применены передовые технологии мониторинга, включая лидарное сканирование, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), системы GPS-мониторинга, «VIMS System» и «Racelogic VBOX».

Целью данного исследования является повышение эффективности транспортных систем угольных разрезов путем разработки и внедрения комплексной системы мониторинга внутрикарьерных технологических дорог в условиях Экибастузского месторождения. Это позволит повысить безопасность транспортных операций, снизить эксплуатационные расходы и продлить срок службы карьерного автотранспорта. Для достижения поставленной цели решается задача разработки комплексной системы мониторинга внутрикарьерных технологических дорог

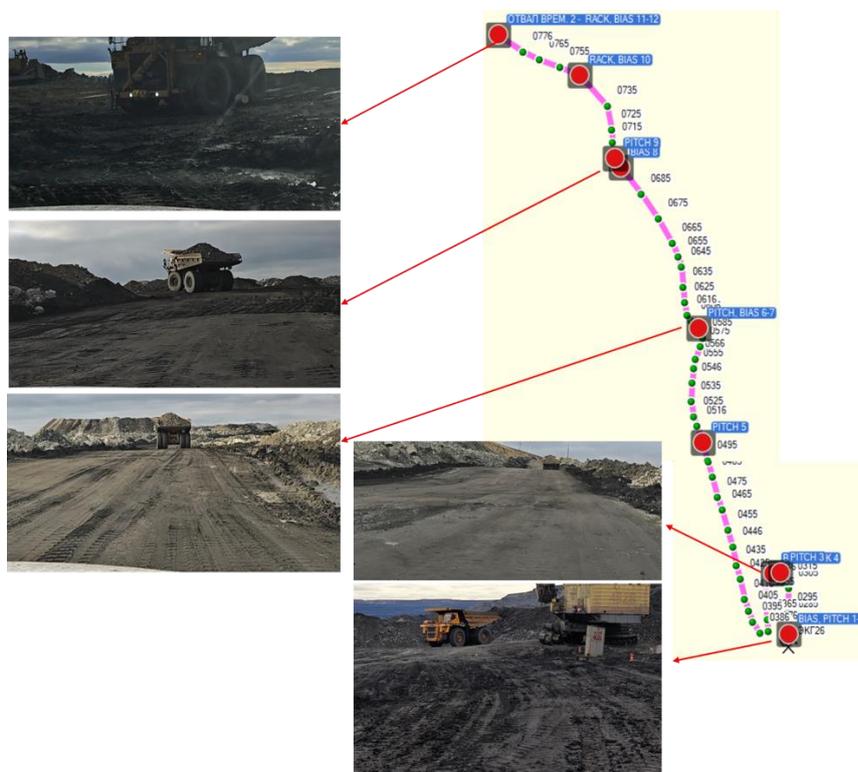
в условиях Экибастузского месторождения, обеспечивающей своевременное получение полной, объективной и достоверной информации о транспортно-эксплуатационном состоянии карьерных дорог. Исследуется оценка технического состояния внутрикарьерных технологических дорог на их соответствие нормативным требованиям документов технического регулирования в сфере транспортных систем угольных месторождений.

3. МЕТОДЫ

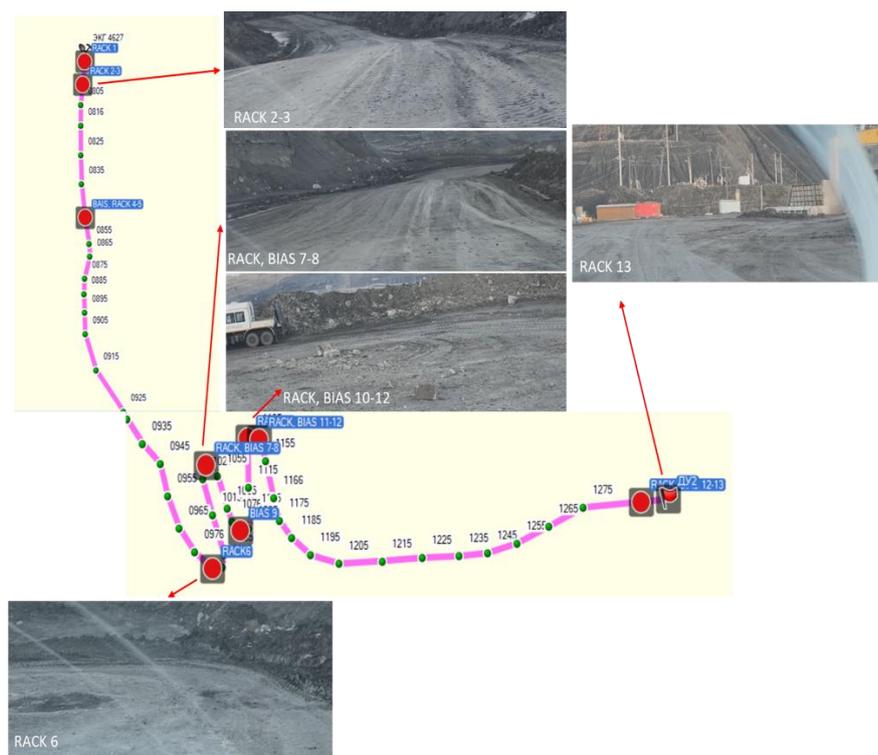
При выполнении исследований метод систематического обзора литературных источников использовался в поисках рациональных подходов к построению многоагентной гибридной системы цифрового мониторинга состояния внутрикарьерных дорог, в которой агенты (нагруженность на металлоконструкции автосамосвалов, износ шин и состояние дефектов карьерных дорог) динамически воздействуют на процесс принятия определенных технологических решений, связанных с эксплуатацией транспортного оборудования горного предприятия.

Для экспериментов были выбраны два участка дороги угольного разреза «Восточный». На участке Маршрут № 1 осуществлялось транспортирование вскрышных горных пород от забоя № 4626 до отвала пустой породы № 2. Длина участка дороги составляла 3.05 км. На участке Маршрут № 2 осуществлялось транспортирование вскрышных горных пород от забоя № 4627 до дробилки ДУ2. Длина участка дороги составляла 3.0 км.

Эти участки дорог являлись наиболее загруженными трассами на данный период работы разреза. Грузенные автосамосвалы передвигались под уклон, а порожние на подъем. Всего в течение экспериментов было совершено по три рейса, по каждому участку. Схемы трасс выбранных участков приведены на Рис. 1.



Маршрут 1 – дорога 201



Маршрут 2 – дорога 210

Рис.1. Схемы выбранных участков дороги при транспортировании вскрышных горных пород: Маршрут 1-от забоя № 4626 до временного отвала №2; Маршрут 2- от забоя № 4627 до дробильной установки ДУ2

Для установления факторов, связанных с воздействием параметров дефектов карьерных дорог на технико-экономические показатели работы транспортных систем разреза, использовались одновременно три метода мониторинга состояния карьерных дорог: Метод определения 3D-модели с помощью лидарной съемки (БПЛА); Система Racelogic VBOX Micro от компании TOO Kaz-Trema Internacional; VIMS System от компании Caterpillar.

Применяемое оборудование и программное обеспечение экспериментального комплекса позволяет с высокой точностью определять следующие параметры: скорости движения автосамосвалов, пройденное расстояние, время рейса, траектории движения, ускорения (замедления), радиусы поворотов и скорости их прохождения, размах нагруженностей на неподрессоренные металлоконструкции автосамосвалов с одновременной фиксацией изменений давления в шинах. При обработке экспериментальных данных использовались модели регрессии размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвалов при их движении от дефектов карьерных дорог, которые могут предсказывать развитие дефектов карьерных дорог.

Объектом исследований являлся случайно выбранный работающий автосамосвал CAT 785D № 210, грузоподъемностью 136 т., перевозивший горную массу по маршруту от ЭКГ 4626 до временного отвала №2 и от ЭКГ 4627 до дробильной установки ДУ2. Самосвал был оборудован бортовыми системами VIMS System и Racelogic VBOX Micro.

Методология с использованием лидарного сканирования съемки (БПЛА) позволяет: проведение аэрофотосъемки с помощью беспилотников на заранее запланированных маршрутах с измерением рельефа поверхности и выявления дефектов, таких как ямы, колеи, просадки, размывы, места скопления воды, волнистость покрытия, эрозия и другие; осуществляет обработку данных в специализированных программах (например, Trimble Business Center) для построения 3D-модели рельефа дорог.

С помощью системы Racelogic VBOX Micro проводилась регистрация данных о скорости, ускорении и уклонах дорог в режиме реального времени во время движения автосамосвалов по карьерным дорогам, выполнялась визуализация результатов на картах уклонов и скоростей с целью выявления опасных участков карьерной дороги.

Применение система VIMS позволяло проводить регистрацию данных о динамике работы карьерных самосвалов, распределении нагрузок на металлоконструкции автосамосвалов от дефектов карьерных дорог во время их движения и осуществлять автоматическую передачу собранных данных на сервер для анализа эксплуатационных показателей. Проведена серия регрессионного анализа зависимости нагрузок на металлоконструкции автосамосвалов от видов и характеристик дефектов карьерных дорог. Установлены уравнения регрессии размахов нагрузок на металлоконструкции автосамосвала в зависимости от высоты неровностей карьерной дороги.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящее время для оценки состояния карьерных дорог применяется широкий спектр методов, различающихся по точности, трудозатратам и стоимости реализации. Наиболее распространённым является визуальный осмотр, отличающийся простотой, оперативностью и низкими затратами, однако он страдает субъективностью и зависит от квалификации персонала. Геодезические измерения обеспечивают высокую точность и позволяют подробно анализировать продольно-поперечный профиль дороги, но требуют значительных временных и трудовых ресурсов, а также специализированного оборудования. Лидарное сканирование даёт высоко детализированные данные, пригодные для автоматического анализа, однако сопровождается высокими затратами на оборудование и необходимостью обработки больших массивов информации. Метод использования GPS и инерциальных навигационных систем (IMU) позволяют реализовать автоматизированный мониторинг неровностей и уклонов дорожного покрытия с высокой точностью, но требуют установки оборудования на подвижные объекты и могут быть подвержены влиянию внешних факторов (например, погодных условий или экранирования сигналов). Таким образом, выбор метода мониторинга зависит от конкретных условий эксплуатации, требуемой точности и доступных ресурсов.

Современным и перспективным направлением является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Одним из восьми существующих направлений применения БПЛА в горнодобывающей промышленности является оптимизация мониторинга состояния внутрикарьерных технологических дорог [31]. Основное внимание при этом уделяется проблемам эксплуатации карьерных дорог, таким как застой воды и разрушение поверхности, что приводит к увеличению времени цикла перевозок, снижению производительности и росту затрат на обслуживание автосамосвалов и карьерных дорог.

Применение дронов DJI Matrice 300 RTK с лидарами Zenmuse L1 в настоящих исследованиях позволило создать детализированные 3D-модели дорожного покрытия. Это способствовало выявлению дефектов, таких как ямы, волнистость покрытия и износ дорожного слоя, снизить расходы (Рис. 2).

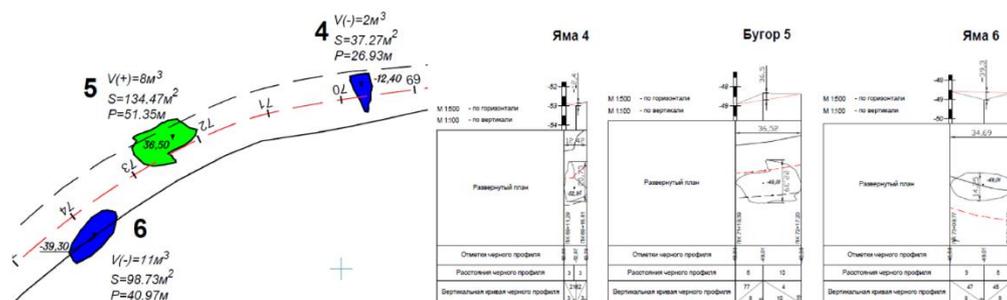


Рис. 2. Дефекты, выявленные при помощи БПЛА DJI Matrice 300 RTK с лидаром Zenmuse L1 для сканирования

Цифровые модели участков дорог, полученные с помощью БПЛА, позволяют быстро и точно выявлять аномалии дорожного покрытия, к тому же аэрофотосъемку можно использовать для оценки состояния ровности дороги и проверки их соответствия плану дороги. Установлено, что БПЛА является наилучшим вариантом для количественной оценки состояния обширной дорожной карьерной сети, включая неровности поверхности, размывы и неровности уклонов, чтобы максимизировать восстановление плохого состояния и снизить общие расходы на дорогу.

Использование системы Racelogic VBOX Micro от компании Michelin дало возможность фиксировать уклоны, скорости движения и неровности дорог, что позволило анализировать их влияние на транспортные потоки (Рис. 3).

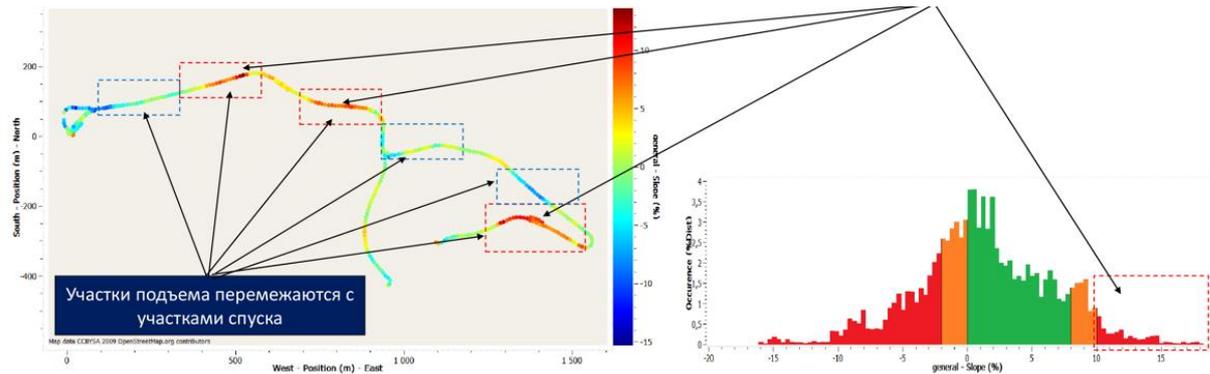


Рис. 3. Распределение уклонов в результате использования Racelogic VBOX Micro

С помощью системы Racelog с VBOX Micro было зарегистрировано следующее состояние дороги: на первом маршруте (CAT 785 #210 от ЭКГ 4626 до временного отвала №2) средняя скорость движения в течение рейса составила, в груженом состоянии - 19 км/ч., в порожнем - 23 км/ч.; снижение скорости движения на волнообразных участках, зафиксировано в пяти случаях.

Применение системы VIMS Application от Caterpillar позволило регистрировать данные о динамике работы карьерных самосвалов, распределении нагрузок и значений величин размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвалов от дефектов карьерных дорог при их движении (Рис. 4).

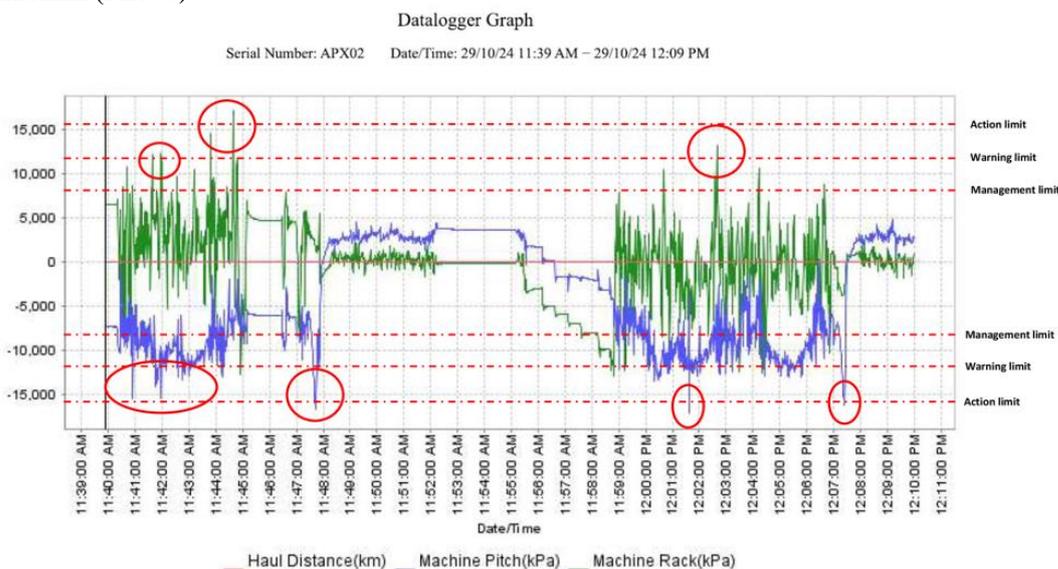


Рис. 4. Данные о характере работы подвесок самосвалов CAT 785C с системы VIMS от Caterpillar

Результаты, полученные с помощью бортовой системы автосамосвала VIMS System от компании Caterpillar, позволяют констатировать следующее: число нагруженностей на металлоконструкции автосамосвалов при их движении от дефектов карьерной дороги,

превышающих допустимые значения регламентированных производителями автосамосвалов в среднем за рейс составило: на первом маршруте (от ЭКГ 4626) - 11 случаев; на втором (от ЭКГ 4627) маршруте - 12 случаев. Фрагменты гистограммы распределения размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвала от дефектов карьерной дороги представлены на Рис. 5 и 6.

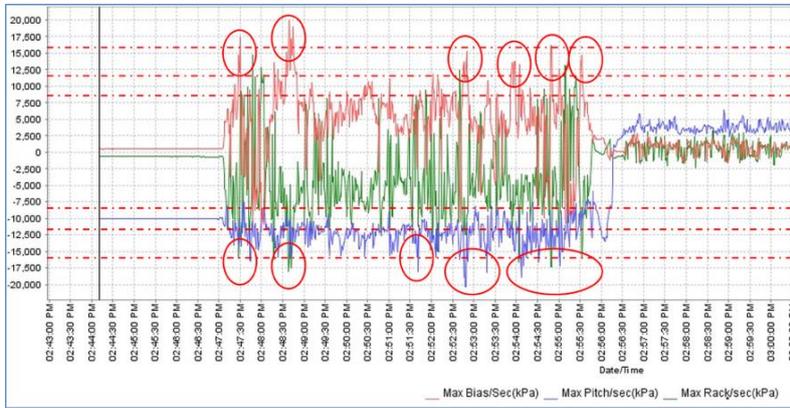


Table 2 – Composite pressure limits for Caterpillar OHT (Pressures in kPa)

Parameter	769 - 777	785	789 - 793	797	
Rack and Bias (Moving truck)	Management limit	± 6000	± 8000	± 8500	± 12500
	Warning limit	± 10000	± 12000	± 12000	± 16500
	Action limit	± 14000	± 16000	± 16000	± 20000
Bias (loading stationary truck)	± 3000	± 3000	± 4000	± 5500	
Max. variation in 2 sec interval	± 5500	± 7000	± 8000	± 12000	
Maximum Strut Pressure	± 12000	± 14000	± 14000	± 22700	



Рис. 5. Фрагменты регистрации размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвала от дефектов дороги. Графики композитного давления с подвесок самосвала САТ 785 #210

Показания композитного давления полученные с самосвала САТ 785D #210, записанные на бортовой компьютер самосвала во время его движения в груженом состоянии от экскаватора ЭКГ 4626 до временного отвала №2.

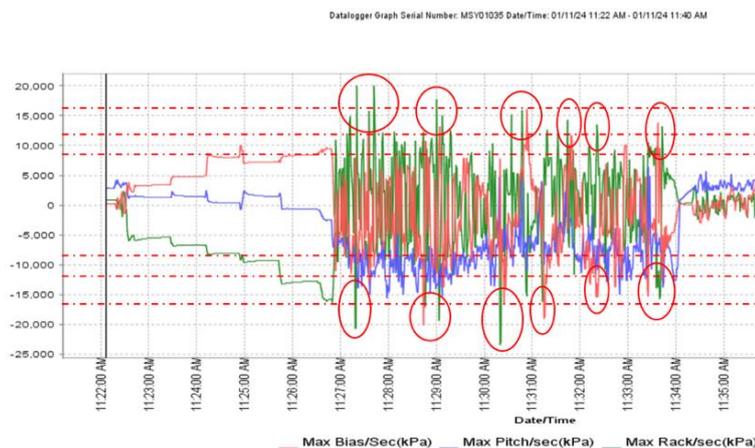


Table 2 – Composite pressure limits for Caterpillar OHT (Pressures in kPa)

Parameter	769 - 777	785	789 - 793	797	
Rack and Bias (Moving truck)	Management limit	± 6000	± 8000	± 8500	± 12500
	Warning limit	± 10000	± 12000	± 12000	± 16500
	Action limit	± 14000	± 16000	± 16000	± 20000
Bias (loading stationary truck)	± 3000	± 3000	± 4000	± 5500	
Max. variation in 2 sec interval	± 5500	± 7000	± 8000	± 12000	
Maximum Strut Pressure	± 12000	± 14000	± 14000	± 22700	



Рис. 6. Фрагменты регистрации размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвала от дефектов дороги. Графики композитного давления с подвесок самосвала САТ 785 #210

Показания композитного давления полученные с самосвала САТ 785D #210 (2 маршрут), записанные на бортовой компьютер самосвала во время движения груженым с экскаватора ЭКГ 4627 и следовавшим на ДУ 2.

По статистическим данным установлены регрессионные зависимости нагруженностей на металлоконструкции автосамосвалов от видов и характеристик дефектов карьерных дорог, которые позволяют не только организовывать планово-предупредительные ремонты технологических карьерных дорог, но и обеспечивают снижение себестоимости процессов транспортировки горной массы. Уравнение регрессии размахов нагруженностей на металлоконструкции автосамосвала в зависимости от высоты неровностей карьерной дороги, приведено на Рис. 7.

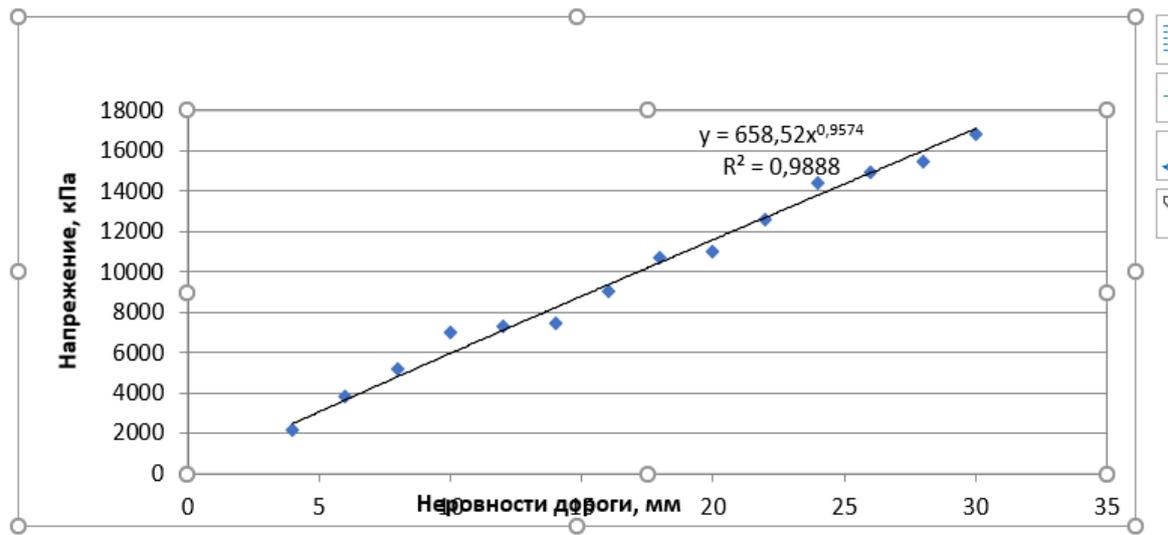


Рис. 7. Уравнение регрессии размахов нагруженности на металлоконструкции автосамосвала в зависимости от высоты неровностей карьерной дороги

Разработанные регрессионные модели машинного обучения, позволяют в реальном режиме времени прогнозировать изменения видов и характеристик дефектов карьерных дорог нагруженности на металлоконструкции автосамосвалов при их движении от состояния дорог.

В результате проведённых экспериментальных и вычислительных исследований подтверждена эффективность разработанного комплекса методов цифрового мониторинга состояния карьерных дорог. Данный подход обеспечивает не только количественную оценку влияния различных дефектов дорожного полотна на нагруженность металлоконструкций карьерных автосамосвалов, но и формирует необходимую информационную базу для планирования мероприятий по техническому обслуживанию подвижного состава и ремонту дорог [32].

Разработанные на основе машинного обучения регрессионные модели позволяют в реальном режиме времени прогнозировать изменения дефектов дорог, опираясь на данные о нагруженности автосамосвалов в процессе их движения. Это обеспечивает возможность перехода к проактивному управлению состоянием карьерных дорог, позволяет эффективно организовать плано-предупредительные ремонты, способствует снижению эксплуатационных затрат (в том числе на ремонт техники, топливо и шины) и повышает уровень безопасности транспортных операций на горных предприятиях.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

При движении карьерных автосамосвалов по различным участкам автодорог водитель стремится к повышению скорости, что приводит к росту производительности. Однако скорость движения не может быть выше некоторых предельных значений, диктуемых тягово-скоростными свойствами автосамосвала, условиями безопасности движения, особенностями эксплуатации крупногабаритных шин и тяговых электродвигателей.

На достаточно крутых уклонах, где скорость движения автосамосвалов не превышает 15 км/ч, расчет может производиться без учета сил сопротивления воздуха [1]:

$$V = \frac{270 * Pot * Et}{W * (f_r + f_\theta)} \quad (1)$$

где:

V – максимальная скорость (км/ч);

Pot – мощность двигателя, (л.с.);

Et – коэффициент, отражающий эффективность трансмиссии;

W – масса автосамосвала, (кг);

fr – коэффициент сопротивления качению;

f_{θ} – коэффициент сопротивления, обусловленный уклоном дороги.

Уравнение (1) используется для расчёта теоретически возможной максимальной скорости, которую может развить автосамосвал на каждом участке карьерной дороги с учётом указанных сопротивлений

Допустимая скорость движения автосамосвалов при прохождении поворотов с уклонами определяется дорожными условиями, в частности величиной сцепления колес с дорогой в поперечном направлении, величиной поперечного уклона карьерной дороги и профильным рельефом. Результаты измерений скоростных режимов автосамосвалов показывают большую вариацию значений мгновенной скорости в фиксированный момент времени при прохождении поворотов. Это определяется стохастической природой транспортного процесса при влиянии на него большого числа факторов. Разброс значений скорости движения автосамосвалов на подъем меньше, чем при движении на спуск. Это обусловлено тем, что в первом случае влияние на распределение скорости оказывают тягово-скоростные свойства и техническое состояние автосамосвала, а во втором случае человеческий фактор, то есть каждый водитель сам выбирает скоростной режим руководствуясь условиями безопасности и личным опытом вождения.

Для поворотов на участках карьерной дороги с уклоном более одного градуса, минимальный радиус поворота карьерной дороги рассчитывается для груженого автосамосвала, движущегося под уклон [11]

$$R = \frac{v^2}{127(e+f)} \quad (2)$$

где:

R – радиус поворота (м);

e – поперечный уклон (м/м);

f – коэффициент сцепления между шинами и дорожной поверхностью (безразмерный).

Эта общепринятая формула (2) для проектирования радиусов поворотов учитывает скорость автосамосвала, сцепление с дорожной поверхностью, уклон дороги, поперечный уклон и радиус поворота. Формула стремится сбалансировать центробежную силу с сопротивлением скольжению и внутренней составляющей силы от веса автосамосвала и поперечного уклона. Рекомендуемые поперечные уклоны для поворотов в зависимости от скоростей движения автосамосвалов приведены в таблице 1, [11].

Таблица 1

Рекомендуемые поперечные уклоны для поворотов карьерных дорог

Радиус поворота (м)	Скорость движения (км/ч)				
	24	32	40	48	>56
15	4%				
30	4%	4%			
45	4%	4%	5%		
60	4%	4%	4%	6%	
90	4%	4%	4%	5%	6%
180	4%	4%	4%	4%	5%
300	4%	4%	4%	4%	4%

На основании анализа полученных данных, для повышения эксплуатационных показателей карьерных дорог можно рекомендовать следующие мероприятия: оптимизировать радиусы поворотов на карьерных дорогах для обеспечения безопасного прохождения самосвалами; применять поперечные уклоны на крутых виражах для компенсации центробежной силы;

регулярно мониторить коэффициент сцепления дорожного покрытия и при необходимости улучшать дренажные системы.

В результате обработки и анализа экспериментальных данных были выявлены следующие проблемы, в частности: на отдельных ключевых маршрутах движения выявлена высокая степень волнистости покрытия дороги, что приводит к увеличению нагрузок на металлоконструкции автосамосвалов от дефектов карьерных дорог, выше допустимых нормативов (Рис. 8) и частым переключениям передач (Рис. 9), что приводит к ускоренному износу шин и основных узлов автосамосвалов.

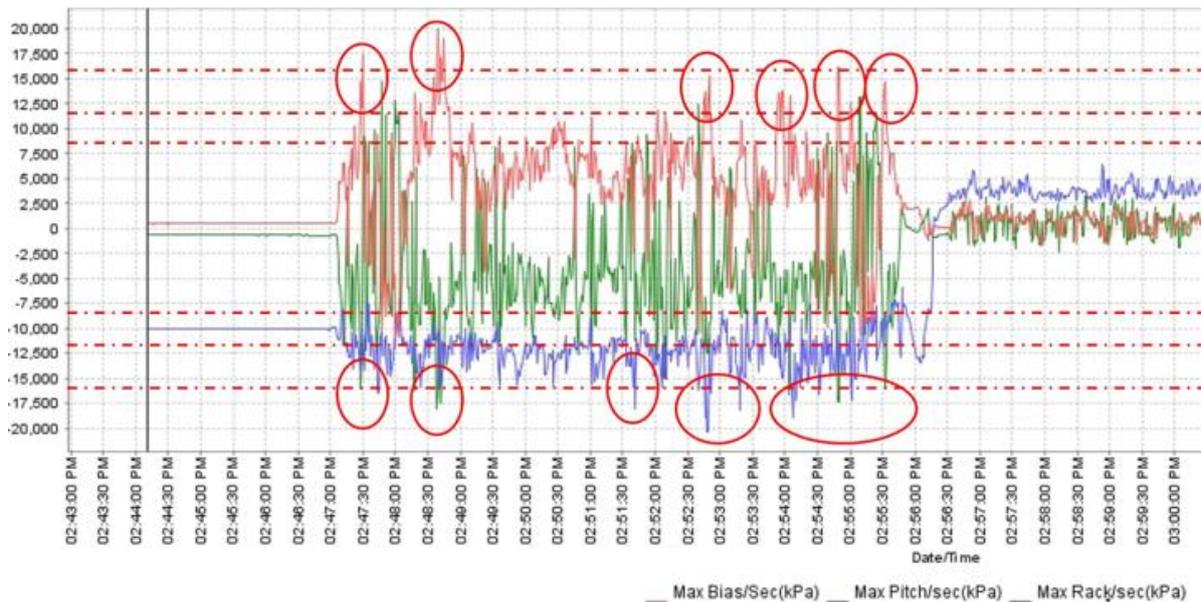


Рис. 8. Показания композитного давления в подвеске самосвала CAT 785D.

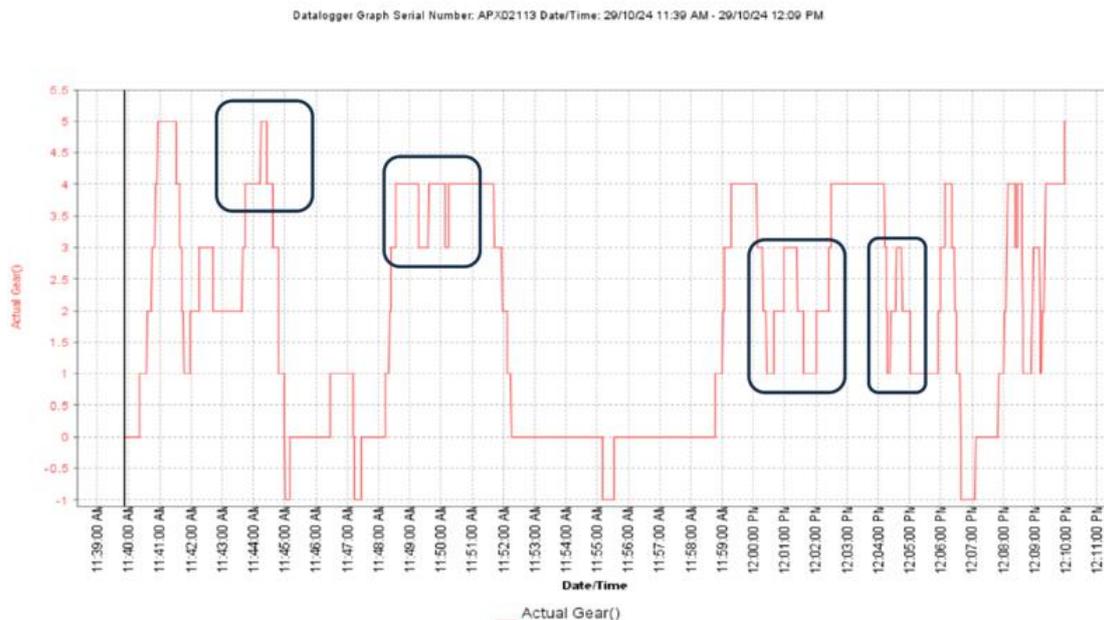


Рис. 9. График переключения передач на волнистых участках дорог

На отдельных участках дорог выявлены завышенные переменные уклоны дорог, достигающие 10–12%, что снижает производительность техники и повышает расход топлива (Рис. 10).

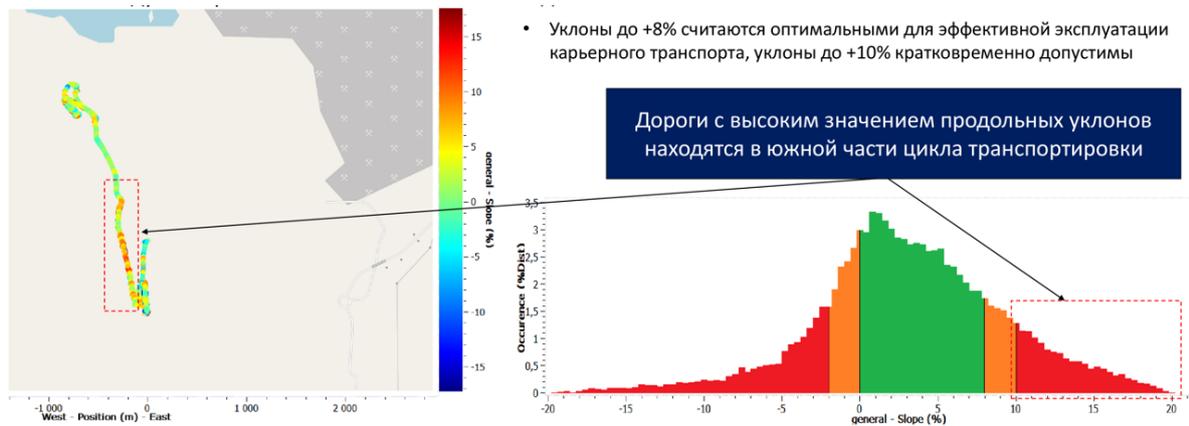


Рис. 10. Карта и диаграмма продольных уклонов

Частые резкие торможения и ускорения, связанные с неудовлетворительным состоянием дорог, увеличивают нагрузку на трансмиссию и тормозную систему автосамосвалов (Рис. 11).

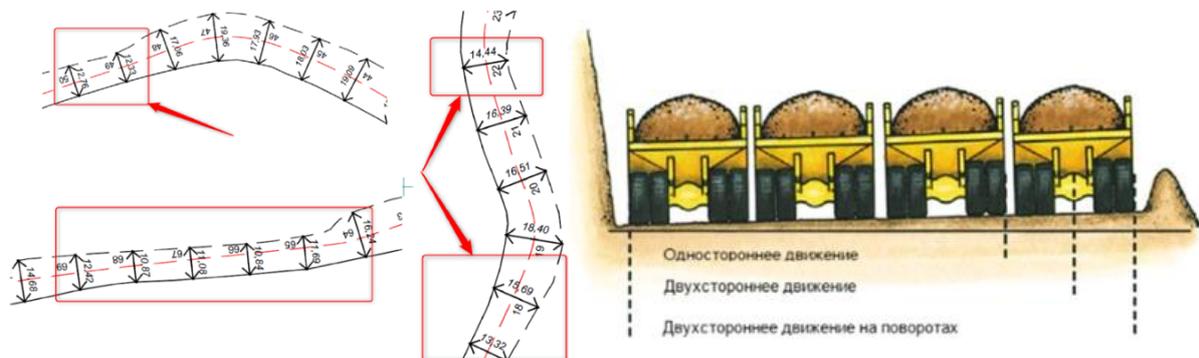


Рис. 11. Дефекты выявленные на виражах поворотов с недостаточной шириной проезжей части дороги

Таким образом, улучшение качества дорожного покрытия и регулярный мониторинг состояния карьерных дорог позволят не только снизить эксплуатационные затраты, но и повысить эффективность работы автотранспорта, за счет продления сроков службы шин и сокращения топливных расходов.

Высокие вибрационные нагрузки увеличивают скорость износа шин и подвески, что приводит к росту эксплуатационных затрат. Вибрационный спектр дороги анализируется с помощью IMU-датчиков, а затем сравнивается с допустимыми значениями по техническим стандартам.

На основе разработанных математических моделей можно оптимизировать скорость движения автосамосвалов в зависимости от уклона дороги и сопротивления качению, что будет способствовать снижению расхода топлива, продлению срока службы шин за счет регулирования скоростного режима на критических участках карьерных дорог.

Результаты анализа выполненных экспериментальных исследований позволяют констатировать о том, что фактическое состояние выбранных участков карьерных дорог, в целом соответствует проектным решениям, однако для улучшения состояния карьерных дорог необходимо достоверно, качественно и своевременно выявлять и устранять критические дефекты, оказывающих отрицательное влияние на эксплуатационные характеристики дорог, способствующих снижению эффективности эксплуатации. Планируется её интеграция в действующую систему управления производством с последующим масштабированием на другие объекты угольных месторождений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянный мониторинг состояния технологических дорог играет ключевую роль в повышении эффективности карьерного транспорта. Регулярный анализ и контроль качества дорожного покрытия позволяют своевременно выявлять дефекты, оптимизировать маршруты и снижать затраты на техническое обслуживание.

Выполненный комплекс экспериментальных и вычислительных экспериментов, подтверждающий работоспособность принятого состава методов цифрового мониторинга карьерных дорог, позволяет не только оценить степень влияния отдельных дефектов карьерных дорог на нагруженность металлоконструкций автосамосвалов, но и обеспечивает создание необходимой информационной базы для прогнозирования работ по техническому обслуживанию автосамосвалов и ремонту карьерных дорог.

Внедрение и поддержка современных технологий мониторинга, таких как лидарное сканирование, GPS-трекинг и анализ вибрационных нагрузок, являются неотъемлемыми элементами эффективной эксплуатации карьерного транспорта. Дальнейшее развитие этих систем позволит повысить экономическую рентабельность добывающих предприятий и снизить воздействие на окружающую среду. Применение комплексного мониторинга состояния карьерных дорог на разрезах «Богатырь» и «Восточный» позволило выявить ключевые проблемы дорожного покрытия и разработать рекомендации по его улучшению. Использование БПЛА, лидарного сканирования и систем GPS-мониторинга доказало свою эффективность в выявлении дефектов и планировании ремонтных работ. Внедрение предложенных мер позволит повысить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации карьерного транспорта.

Разработанные на основе машинного обучения регрессионные модели позволяют в реальном времени прогнозировать изменения дефектов дорог, опираясь на данные о нагруженности автосамосвалов в процессе их движения. Это обеспечивает возможность перехода к проактивному управлению состоянием карьерных дорог, позволяет эффективно организовать планово-предупредительные ремонты, способствует снижению эксплуатационных затрат (в том числе на ремонт техники, топливо и шины) и повышает уровень безопасности транспортных операций на горных предприятиях.

Достигнутая точность прогнозирования изменений характеристик дефектов составляет до 85–90%, что подтверждено результатами валидации на экспериментальных данных. Разработанная система цифрового мониторинга и аналитики прошла успешное пилотное тестирование на нескольких участках угольного карьера и в настоящее время готовится к поэтапному внедрению в промышленную эксплуатацию. Планируется её интеграция в действующую систему управления производством с последующим масштабированием на другие объекты угольных месторождений.

Литература

1. Silva, P.G.C. & de Lima, H.M. & Torres, V.F.N. et al. Evaluation of road roughness and its influence on operating parameters in open-pit mines. *Concilium*. 2024. Vol. 24. No. 17. P. 654-670. DOI: 10.53660/CLM-3947-24R52.
2. Soufastai, A. & Fouladgar, M. Advanced analytics to improve haul truck energy efficiency in surface mines. In: *Advanced analytics in mining: Using analytics to drive better business decisions*. Cham: Springer. 2022. P. 539-556. DOI: 10.1007/978-3-030-91589-6_17.
3. Shroubek, F. & Shorel, M. & Jack, J. Accurate calculation of the International Roughness Index. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. DOI: 10.1007/s42947-021-00097-z.
4. Wen, W. *Road Roughness Detection by Analysing IMU Data*. Master Thesis. Stockholm: School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH). 2008. 100 p.
5. Hettiarachchi, C. & Yuan, J. & Amirkhanian, S. et al. Measurement and evaluation of pavement roughness using the IRI parameter – A review. *Measurement*. 2023. Vol. 206. No. 112284.

6. Zhou, W. & Zhu, C. & Li, W. et al. Summary of research on road roughness. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 768(4). No. 042032. P. 1-4. DOI: 10.1088/1757-899X/768/4/042032.
7. Douglas, A. Haul road roughness measurement using georeferenced truck vibration. *New Trends in Production Engineering*. 2019. Vol. 2. No. 1. P. 416-423. DOI: 10.2478/ntpe-2019-0044.
8. Sun, M. & Nguyen, V. The influence of vibrations from different types of heavy trucks on pavement damage. *Maintenance, Reliability and Condition Monitoring*. 2023. Vol. 3. No. 1. P. 1-9. DOI: 10.21595/marc.2022.23020.
9. Wang, G. & Burrow, M. & Ghataora, G. Study of the factors affecting road roughness measurement using smartphones. *Journal of Infrastructure Systems*. 2020. Vol. 26(3). No. 04020020. P. 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000558.
10. Komnos, D. & Broekaert, S. & Zacharof, N. et al. A method for quantifying the resistances of light and heavy-duty vehicles under in-use conditions. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 299. No. 117810. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117810.
11. Tannant, D.D. & Regensburg, B. *Guidelines for Mine Haul Road Design*. UBC Faculty Research and Publications. 2001. 111 p. DOI: 10.14288/1.0102562.
12. Thompson, R.J., Visser, A.T. Mine haul road maintenance management systems. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2003. P. 303-312. Available at: <https://www.saimm.co.za/Journal/v103n05p303.pdf>.
13. Grabowski, Ł. & Drozd, A. & Karabela, M.M. et al. Aerodynamic and rolling resistances of heavy duty vehicle. Simulation of energy consumption. *Applied Computer Science*. 2024. Vol. 20. No. 3. P. 116-131. DOI: 10.35784/acs-2024-32.
14. Fakhri, M. & Karimi, S.M. & Barzegaran, J. Prediction of International Roughness Index based on surface distress measurement under different climate and pavement conditions using laser crack measurement system. *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2675. No. 11. P. 397-412. DOI: 10.1177/03611981211017906.
15. Idrefors, L. & Hjort, M. & Kharrazi, S. et al. Rolling resistance and its relation to operating conditions: A literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2021. Vol. 235. No. 12. P. 2931-2948. DOI:10.1177/09544070211011089.
16. Navarro Torres, V.F. & Paniz, I.L. Rolling resistance analysis in open pit mining hauling. *International Journal of Development Research*. 2022. Vol. 12. No. 10. P. 59499-59503. DOI: 10.37118/ijdr.25591.10.2022
17. da Silva Menezes, D. & Torres, V.F.N. Influence of mine road grade and rolling resistance on haulage productivity and costs. *Revista de Medio Ambiente y Minería*. 2021. Vol. 6. No. 2. P. 14-22. ISSN: 2519-5352.
18. Medinac, F. & Esmaeili, K. Integrating unmanned aerial vehicle photogrammetry in design compliance audits and structural modelling of pit walls. In: Dight, P.M. (ed.) *Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2020. P. 1439-1454. DOI: 10.36487/ACG_repo/2025_99.
19. Medinac, F. & Bamford, T. & Hart, M. et al. Haul road monitoring in open pit mines using unmanned aerial vehicles: a case study at bald mountain mine site. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020. Vol. 37. P. 1877-1883. ISSN: 2524-3462. DOI: 10.1007/s42461-020-00291-w.
20. Dang, T.M. & Nguyen, B.D. Applications of UAVs in mine industry: A scoping review. *Journal of Sustainable Mining*. 2023. Vol. 22(2). No. 5. P. 128-146. ISSN: 2300-3960. DOI: 10.46873/2300-3960.1384.
21. Li, C. & Yao, G. & Long, T. et al. A novel method for 3D object detection in open-pit mine based on hybrid solid-state LiDAR point cloud. *Journal of Sensors*. 2024. Vol. 2024. No. 5854745. ISSN:1687-725X. DOI: 10.1155/2024/5854745

22. Beretta, D. & Rodrigues, A.L. & Peroni, R.L. et al. Automated lithological classification using UAVs and machine learning in an open-pit mine. *Applied Earth Science*. 2019. Vol. 128. No. 3. P. 79-88. DOI: 10.1080/25726838.2019.1578031.
23. Dastgheibifard, S. & Asnafi, M. A review of potential applications of unmanned aerial vehicles in the construction industry. *Sustainable Structures and Materials*. 2018. Vol. 1. No. 2. P. 44-53. DOI: 10.26392/SSM.2018.01.02.044.
24. Nawaz, H. & Ali, H.M. & Massan, S. Applications of unmanned aerial vehicles: A review. *3C Tecnología_Glosas de innovación aplicadas a la pyme. Special Issue*. 2019. P. 85-105. DOI: 10.17993/3ctecno.2019.specialissue3.85-105.
25. Park, S. & Choi, Y. Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: a review. *Minerals*. 2020. Vol. 10(8). No. 663. DOI: 10.3390/min10080663.
26. Shahmoradi, J. & Talebi, E. & Roganchi, P. et al. A comprehensive review of UAV technology applications in mining. *Drones*. 2020. Vol. 4(3). No. 34. DOI: 10.3390/drones4030034.
27. Xiang, J. & Chen, J. & Sofia, G. et al. Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77. No. 220.
28. Beretta, F. & Shibata, H. & Cordova, R. et al. Topographic modeling using UAVs compared to traditional survey methods in mining. *REM - International Engineering Journal*. 2018. Vol. 71. P. 463-470. DOI: 10.1590/0370-44672017710074.
29. Nguyen, L.K. Accuracy assessment of quarry surface digital models created using UAV images in kinematic post-processing mode. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2021. Vol. 62. No. 4. P. 38-47. DOI: 10.46326/JMES.2021.62(4).05.
30. Singhal, G. & Bansod, B. & Mathew, L. Classification of UAVs, application areas, and challenges: A review. 2018. DOI: 10.20944/preprints201811.0601.v1
31. De Blasiis, M.R. & Di Benedetto, A. & Fiani, M. et al. Pavement roughness evaluation using LiDAR technology. *Coatings*. 2020. Vol. 11(1). No. 17. DOI: 10.3390/coatings11010017.
32. Alegre, D. & Peroni, R.L. & Aquino, E.R. & et al. A method for evaluating rolling resistance on haul roads using fleet management system data. *Mining Technology*. 2021. Vol. 130. No. 3. P. 176-187.