

ISBN 978-83-975865-2-9

Transport Problems 2026

INTERNATIONAL CONGRESS PROCEEDINGS



fot. Wojciech Kamiński

UNDER THE HONORARY
PATRONAGE OF



Silesian
University
of Technology



Polish National
Association of
Doctoral Candidates

KRD



XVIII INTERNATIONAL
SCIENTIFIC
CONFERENCE

24-26.06 2026

Katowice - Łódź

22-23.06.2026

Katowice

XV INTERNATIONAL
SYMPOSIUM OF YOUNG
RESEARCHERS



Silesian University of Technology
Faculty of Transport and Aviation Engineering

Transport Problems 2026

INTERNATIONAL CONGRESS

Proceedings

XVIII International Scientific Conference

XV International Symposium of Young Researchers

UNDER THE HONORARY PATRONAGE OF



Silesian University
of Technology



Polish National
Association of
Doctoral Candidates

KRD

Transport Problems
International Scientific Journal

ISBN 978-83-975865-2-9

editor-in-chief

A. Sładkowski

editorial board

*M. Bepko, P. Czech, M. Cieśla, T. Haniszewski,
M. Juzek, W. Kamiński, P. Marzec, G. Wojnar*

*CONFERENCE -
TABLE OF
CONTENTS*

*SYMPOSIUM -
AUTHORS LIST*

*CONFERENCE -
AUTHORS LIST*

*CONFERENCE &
SYMPOSIUM
PROGRAM*

*SYMPOSIUM -
TABLE OF
CONTENTS*

*CONFERENCE &
SYMPOSIUM
PROCEEDINGS*

*CONFERENCE
PRESENTA-
TIONS*

*SYMPOSIUM
PRESENTA-
TIONS*

No.	Author, title	Pages	
		Begin	End
9	Filip NOWAK, Nikola TRAFAS, Maria CIEŚLA Apatial analysis of truck parking areas and attractiveness assessment of highway service areas in southern Poland	762	773
10	Aleksander SŁADKOWSKI, Aman SHAKENOV, Assem UTEGENOVA, Ainura ORUMBASSAROVA, Ivan STOLPOVSKIKH Assessment of the dynamic impact of road defects on the suspension elements of quarry dump trucks	774	789
11	Aleksander SOBOTA, Mateusz JAROSIK Research into the correctness of adopting values for inter-stop travel times – a case study for selected bus lines organised by the metropolitan transport authority	790	797
12	Szymon SURMA, Mateusz JURCZAK, Jerzy ŁUKASIK, Michał MATOWICKI The use of photovoltaics to power crossing systems	798	811
13	Maciej SZKODA, Weronika ŚRENIAWSKA A life cycle cost (LCC) model for urban buses that takes into account long-term operating costs and environmental impact	812	823
14	Komil TURAEV, Daniela BARIĆ, Silvestar GRABUŠIĆ A methodological framework for regional railway dataset development in PTV VISUM : application to the Uzbekistan railway network	824	831
15	Changlin WANG, Xiaoyun TANG, Xuelin WANG, Qian LI, Zhumadil BAIGUNCHEKOV Design and application research of a bionic multi-fingered intelligent gripping system for underwater pipeline inspection robots	832	841
16	Artur WOLAK, Kamil FIJOREK, Radosław WOLNIAK Perceived counterfeit risk and trust architecture in the engine oil market: evidence from a digital automotive community	842	855
17	Tomasz ZONTEK Perceived value and perceived risk as determinants of students' willingness to use ride-sharing services: a PLS-SEM study from Poland	856	868

CONGRESS “TRANSPORT PROBLEMS” 2026
XV INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF YOUNG RESEARCHERS

Keywords: карьерные автодороги; дорожные дефекты; карьерные автосамосвалы; подвеска автосамосвалов; динамические нагрузки; цифровой мониторинг

Aleksander ŚLADKOWSKI

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

Aman SHAKENOV, Assem UTEGENOVA*, Ainura ORUMBASSAROVA, Ivan STOLPOVSKIKH

Satbayev University
Satbayeva 22, 050000 Almaty, Kazakhstan

* *Corresponding author.* E-mail: utegenovaassema@gmail.com

ASSESSMENT OF THE DYNAMIC IMPACT OF ROAD DEFECTS ON THE SUSPENSION ELEMENTS OF QUARRY DUMP TRUCKS

Summary. The condition of roads within quarries is one of the key factors determining the operational reliability and efficiency of heavy-duty quarry dump trucks. The presence of road defects, including potholes, rutting, localized subsidence, and deviations in the longitudinal profile, leads to increased dynamic loads on the vehicle’s suspension components and load-bearing structures. Prolonged exposure to shock and vibration loads contributes to accelerated wear of suspension components, a reduction in equipment service life, and increased maintenance costs. This paper presents an assessment of the dynamic impact of road defects on the suspension components of quarry dump trucks, based on comprehensive digital monitoring of quarry road conditions and an analysis of operational driving parameters. A high-precision GNSS monitoring system was used to record driving parameters, enabling the measurement of vehicle speed, acceleration, and coordinates. Dynamic loads were assessed using data from the on-board technical condition monitoring system of the quarry dump truck, based on signals from the suspension hydraulic cylinders. Digital monitoring of the condition of open-pit mine roads was carried out using unmanned aerial vehicles and laser scanning technologies. Processing of point clouds made it possible to construct high-precision digital models of the road surface, identify local pavement defects, and determine their geometric parameters. The results demonstrate the potential of digital monitoring technologies for assessing the condition of quarry roads to improve the reliability and durability of open-pit mining transport systems.

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ДОРОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ ПОДВЕСКИ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Аннотация. Состояние дорог в карьерах является одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационную надежность и эффективность тяжелых карьерных самосвалов. Наличие дефектов дорог, включая выбоины, колеи, локальные просадки и отклонения продольного профиля, приводит к увеличению динамических нагрузок на компоненты подвески и несущие конструкции автомобиля. Длительное воздействие ударных и вибрационных нагрузок способствует ускоренному износу компонентов подвески, сокращению срока службы оборудования и увеличению затрат на техническое обслуживание. В данной статье представлена оценка динамического воздействия дефектов

дорог на компоненты подвески карьерных самосвалов на основе комплексного цифрового мониторинга состояния дорог в карьерах и анализа эксплуатационных параметров движения. Для регистрации параметров движения использовалась высокоточная система мониторинга GNSS, позволяющая измерять скорость, ускорение и координаты автомобиля. Динамические нагрузки оценивались с использованием данных бортовой системы технического мониторинга состояния карьерного самосвала на основе сигналов от гидравлических цилиндров подвески. Цифровой мониторинг состояния карьерных дорог проводился с использованием беспилотных летательных аппаратов и технологий лазерного сканирования. Обработка облаков точек позволила построить высокоточные цифровые модели дорожного покрытия, выявить локальные дефекты покрытия и определить их геометрические параметры. Результаты демонстрируют потенциал технологий цифрового мониторинга для оценки состояния карьерных дорог с целью повышения надежности и долговечности транспортных систем открытых горных выработок.

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытая разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается интенсивной эксплуатацией карьерного автомобильного транспорта, который является основным элементом технологической транспортной системы карьера. Эффективность работы карьерных автосамосвалов во многом определяется техническим состоянием внутрикарьерных технологических автомобильных дорог, так как качество дорожного покрытия непосредственно влияет на скорость движения, расход топлива, надежность узлов и агрегатов, а также безопасность транспортного процесса [1-3].

В процессе эксплуатации карьерных дорог формируются различные типы дефектов дорожного покрытия, включая выбоины, колеи, локальные просадки, волнообразность и разрушение поверхности. При движении карьерных автосамосвалов по таким участкам возникают дополнительные динамические воздействия, сопровождающиеся ударными и вибрационными нагрузками на элементы подвески, раму, колесные узлы и другие несущие конструкции машины. Длительное воздействие циклических динамических нагрузок приводит к ускоренному усталостному износу элементов подвески карьерных автосамосвалов, снижению их эксплуатационного ресурса и увеличению затрат на техническое обслуживание.

Существующие исследования в области динамики карьерного транспорта в основном посвящены вопросам многодельного моделирования автосамосвалов, анализу нагруженности несущих систем, а также моделированию процессов загрузки и разгрузки горной массы. Однако вопросам комплексной оценки влияния реальных дорожных дефектов на динамические нагрузки элементов подвески карьерных автосамосвалов уделяется недостаточное внимание. Особенно ограничено количество исследований, основанных на использовании синхронизированных данных телеметрии транспортных средств и цифровых моделей дорожной поверхности.

Современное развитие цифровых технологий позволяет применять комплексные системы мониторинга, включающие GNSS-навигацию, бортовые диагностические системы, беспилотные летательные аппараты и лазерное сканирование дорожной инфраструктуры. Использование таких технологий обеспечивает возможность высокоточного определения координат дорожных дефектов, регистрации параметров движения автосамосвалов и оценки динамических нагрузок в реальных условиях эксплуатации.

Для реализации комплексной оценки динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов использовалась интегрированная система цифрового мониторинга, включающая GNSS-навигацию, бортовые диагностические системы, UAV-мониторинг и технологии LiDAR-сканирования (Рис. 1).

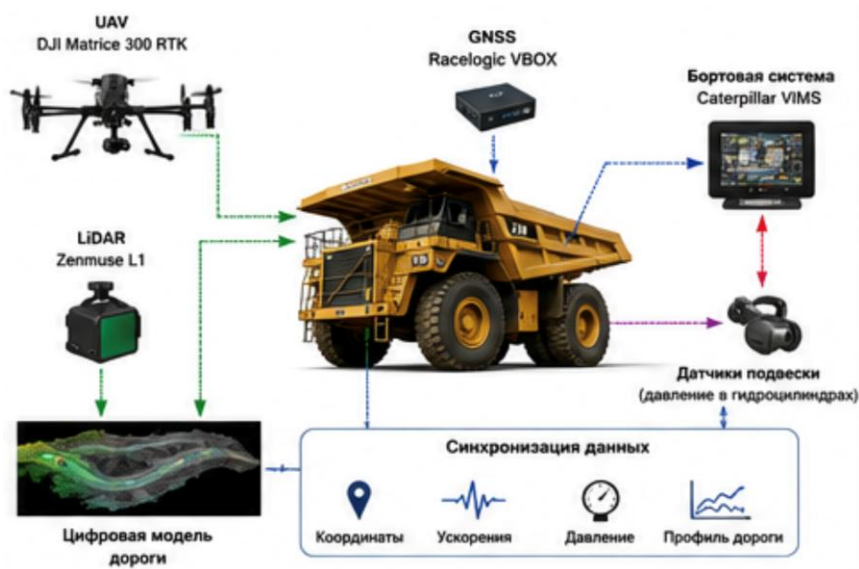


Рис. 1. Комплексная схема цифрового мониторинга состояния карьерных дорог и динамических нагрузок карьерного автосамосвала

Представленная схема демонстрирует взаимосвязь между системой мониторинга дорожного покрытия и параметрами движения карьерного автосамосвала, обеспечивая возможность синхронизированного анализа динамических нагрузок и геометрии дорожных дефектов.

Целью настоящего исследования является оценка динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов на основе цифрового мониторинга состояния карьерных дорог и синхронизированного анализа эксплуатационных параметров транспортных средств [4].

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: выполнение цифрового мониторинга состояния карьерных автомобильных дорог; выявление и классификация локальных дефектов дорожного покрытия; регистрация параметров движения карьерного автосамосвала; оценка динамических нагрузок, возникающих в элементах подвески; определение наиболее опасных участков дороги по уровню динамического воздействия; установление зависимости между параметрами дорожных дефектов и величиной динамических нагрузок.

Научная новизна исследования заключается в комплексном использовании цифровых технологий мониторинга карьерных дорог и телеметрических систем для оценки динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов в реальных условиях эксплуатации.

Исследование основано на анализе данных полевого мониторинга параметров движения карьерного автосамосвала и цифровой модели дорожной поверхности, полученной по результатам UAV и LiDAR-съёмки.

2. МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ

Исследование динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов выполнялось на основе комплексного цифрового мониторинга состояния карьерных автомобильных дорог и анализа эксплуатационных параметров движения транспортных средств в реальных условиях открытых горных работ АО «Богатырь Комир». Объектом

исследования являлся карьерный автосамосвал CAT 785C, осуществляющий транспортировку горной массы по маршруту от экскаватора ЭКГ 1903 до зоны разгрузки Штабель №8.

Методология исследования основывалась на синхронизированном применении GNSS-мониторинга, телеметрического контроля параметров подвески и цифрового мониторинга дорожной поверхности с использованием UAV и LiDAR-технологий. Комплексный подход обеспечивал возможность пространственной привязки параметров движения карьерного автосамосвала к геометрическим характеристикам дорожного покрытия и локальным дорожным дефектам.

Для регистрации параметров движения карьерного автосамосвала использовалась GNSS-система Racelogic VBOX Micro. В процессе мониторинга выполнялась регистрация координат движения, скорости транспортного средства, продольных и поперечных ускорений, траектории движения и пройденного расстояния. Полученные телеметрические данные использовались для анализа эксплуатационных режимов движения карьерного автосамосвала и определения участков возникновения максимальных динамических воздействий.

Оценка динамических нагрузок элементов подвески выполнялась с применением бортовой системы мониторинга Caterpillar VIMS (Vital Information Management System). Для анализа использовались параметры композитного давления подвески карьерного автосамосвала CAT 785C №142. Исследование проводилось на основе анализа параметров PITCH и RACK, характеризующих изменение нагрузок элементов подвески и торсионных воздействий на раму автосамосвала при движении по дефектным участкам карьерной дороги. Дополнительно анализировались изменения давления в гидроцилиндрах подвески и колебательные процессы, возникающие при прохождении локальных дорожных дефектов.

Цифровой мониторинг состояния карьерных автомобильных дорог выполнялся с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 300 RTK, оснащённого LiDAR-сканером Zenmuse L1. Аэрофотосъёмка и лазерное сканирование выполнялись по заранее заданным маршрутам с последующей обработкой облаков точек в программном комплексе Trimble Business Center. На основе полученных данных были построены цифровые модели дорожной поверхности, продольные и поперечные профили исследуемого участка дороги, а также выполнено выявление локальных дорожных дефектов, включая выбоины, колеи, волнообразность, локальные просадки и нарушения продольного профиля.

Классификация дорожных дефектов выполнялась по геометрическим параметрам повреждений дорожного покрытия, включая глубину, длину, ширину, площадь повреждения и перепады высот поверхности. Все выявленные дефекты привязывались к единой системе координат, что обеспечивало возможность синхронизации результатов дорожного мониторинга с параметрами движения карьерного автосамосвала и данными системы контроля подвески [5].

Для оценки динамического воздействия дорожных дефектов анализировались параметры ускорений карьерного автосамосвала, изменения давления в гидроцилиндрах подвески и геометрические характеристики дорожных дефектов. Сравнительный анализ параметров движения и состояния дорожного покрытия позволил определить наиболее опасные участки карьерной дороги, сопровождающиеся повышенным уровнем динамических нагрузок и вибрационных воздействий на элементы подвески карьерного автосамосвала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью оценки влияния геометрических параметров дефектов карьерной дороги на динамические нагрузки элементов подвески автосамосвала был выбран характерный участок транспортного маршрута открытых горных работ. Схема исследуемого участка карьерной автомобильной дороги с указанием сегментов движения, зон мониторинга и точек регистрации данных приведена на Рис. 2.

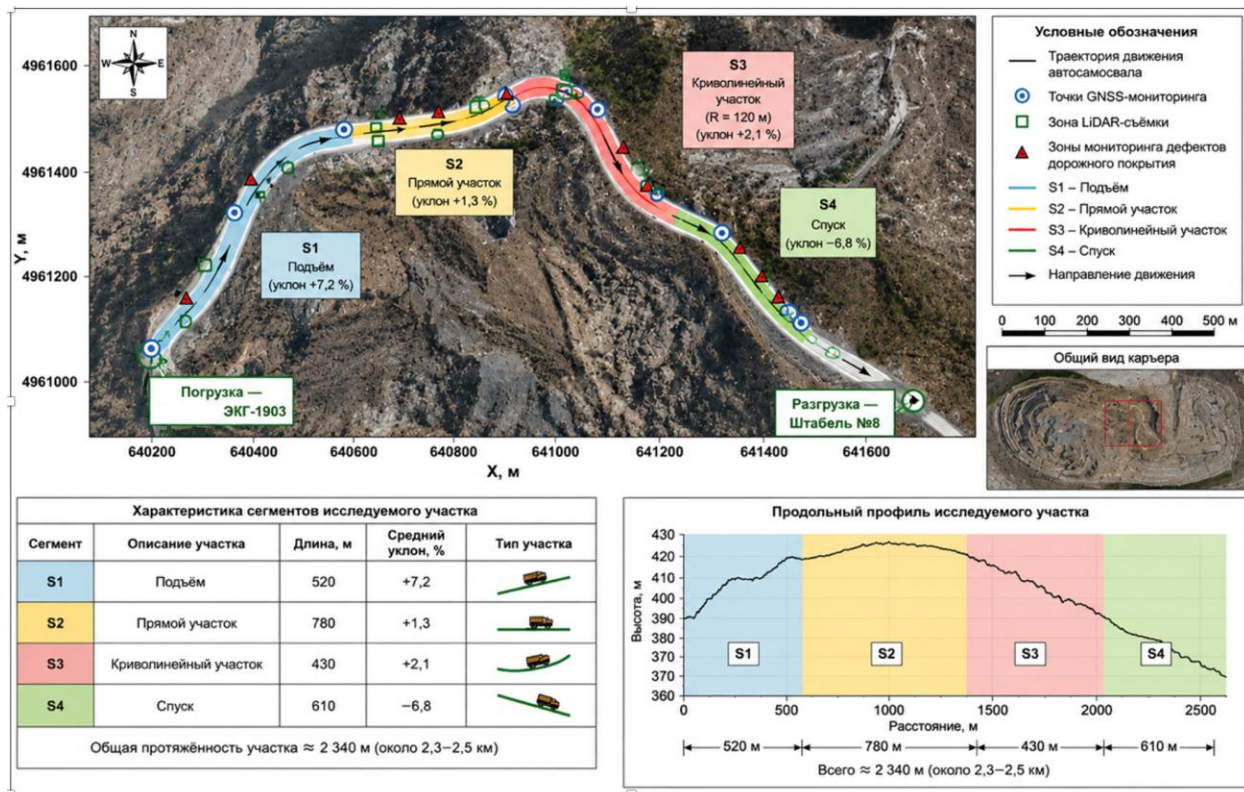


Рис. 2. Схема исследуемого участка карьерной автомобильной дороги

Выбор исследуемого участка обусловлен его характерностью для условий эксплуатации открытых горных работ и наличием различных элементов плана и профиля дороги, оказывающих влияние на динамическое взаимодействие транспортного средства с дорожным покрытием.

На схеме показаны основные сегменты исследуемого участка дороги, включающие подъем, прямолинейный участок, криволинейный поворот и спуск. Такое разделение позволяет оценить влияние геометрических параметров дороги и эксплуатационных режимов движения на формирование динамических нагрузок при различных условиях работы карьерного автосамосвала.

Дополнительно на рисунке отображены траектория движения транспортного средства, точки GNSS-мониторинга, зоны LiDAR-съемки и участки регистрации дорожных дефектов. Привязка всех объектов к единой системе координат обеспечивает возможность синхронизации телеметрических данных движения автосамосвала с цифровой моделью дорожной поверхности и параметрами локальных дефектов покрытия.

Продольный профиль исследуемого участка демонстрирует изменение высотных отметок и уклонов дороги, что является важным фактором при анализе сопротивления движению и формирования динамических нагрузок на элементы подвески. Характеристики сегментов дороги, включая их длину, средний уклон и тип участка, использовались при интерпретации результатов мониторинга и сравнительном анализе эксплуатационных режимов движения.

Таким образом, представленная схема является основой для комплексного анализа взаимосвязи между состоянием карьерной дороги, геометрическими параметрами дорожных дефектов и уровнем динамического воздействия на элементы подвески карьерного автосамосвала [6].

Для регистрации параметров движения карьерного автосамосвала использовалась высокоточная GNSS-система мониторинга Racelogic VBOX Micro. GNSS-мониторинг использовался для анализа маршрута движения карьерного автосамосвала от зоны погрузки до

участка разгрузки с привязкой эксплуатационных параметров к GPS-маршруту движения. В процессе мониторинга выполнялась синхронная регистрация координат движения, скорости транспортного средства и параметров ускорений.

В процессе исследования регистрировались следующие параметры: скорость движения автосамосвала; продольные ускорения; поперечные ускорения; координаты движения; пройденное расстояние; траектория движения.

Использование GNSS-мониторинга позволило определить участки возникновения максимальных динамических воздействий и выполнить привязку зарегистрированных нагрузок к конкретным дорожным дефектам.

На Рис. 3 представлена структура системы GNSS-мониторинга, использованной для регистрации эксплуатационных параметров движения карьерного автосамосвала в условиях открытых горных работ. Система включает GNSS-базовую станцию, бортовое GNSS-оборудование, антенну, регистратор данных и программное обеспечение для обработки и синхронизации информации.

GNSS-приемник, установленный на карьерном автосамосвале, обеспечивал регистрацию координат движения, скорости, ускорений и траектории движения транспортного средства в режиме реального времени. Передача RTK-поправок от базовой станции позволяла повысить точность позиционирования и обеспечить высокую достоверность пространственной привязки телеметрических данных.

Полученные данные использовались для синхронизации параметров движения карьерного автосамосвала с цифровой моделью дорожной поверхности и координатами локальных дорожных дефектов. Это обеспечило возможность определения участков возникновения максимальных динамических нагрузок и анализа влияния геометрии дорожного покрытия на параметры движения транспортного средства.

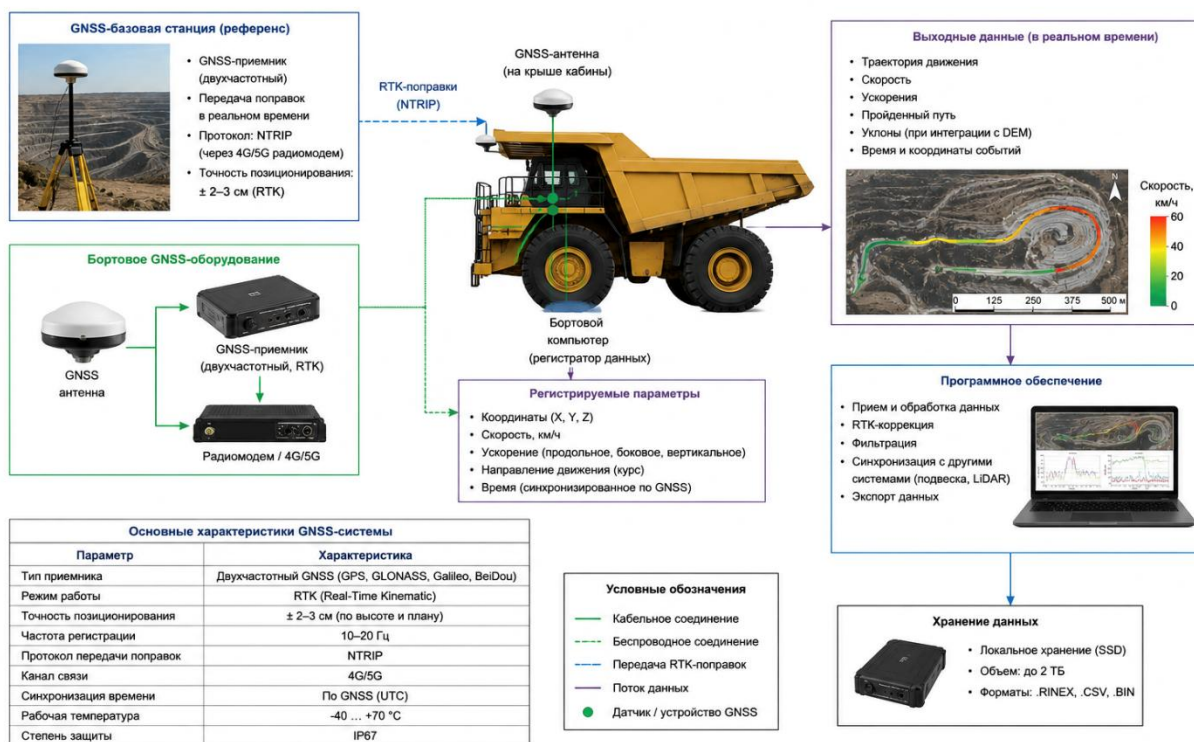


Рис. 3. Система GNSS-мониторинга параметров движения карьерного автосамосвала

Особое значение GNSS-мониторинг имеет при исследовании динамического воздействия дорожных дефектов, поскольку обеспечивает синхронизацию телеметрических данных с цифровой моделью дорожной поверхности и результатами LiDAR-сканирования. Это позволяет определить взаимосвязь между геометрическими параметрами дорожных дефектов и характером изменения динамических нагрузок элементов подвески.

Кроме того, применение RTK-коррекции обеспечивает высокую точность пространственного позиционирования, что является важным условием при анализе локальных дефектов дорожного покрытия и оценке их влияния на эксплуатационные параметры карьерного автосамосвала.

Таким образом, представленная система GNSS-мониторинга является одним из ключевых элементов комплексной цифровой методики исследования динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов.

Для оценки динамических нагрузок элементов подвески использовалась бортовая система мониторинга технического состояния карьерного автосамосвала Caterpillar VIMS (Vital Information Management System). Для анализа использовались данные композитного давления подвески карьерного автосамосвала CAT 785C №142, зарегистрированные бортовой системой Caterpillar VIMS в процессе движения гружёного автосамосвала от экскаватора ЭКГ 1903 до зоны разгрузки Штабель №8.

Анализ выполнялся по параметрам PITCH и RACK, характеризующим изменение нагрузок в элементах подвески при движении по дефектным участкам карьерной дороги. Параметр PITCH отражает изменение нагрузок, возникающих при продольных и поперечных неровностях дорожного покрытия, а параметр RACK характеризует диагональные нагрузки и торсионные воздействия на раму автосамосвала.

Оценка динамического воздействия выполнялась по данным: давления в гидроцилиндрах подвески; колебаний нагрузок; изменения рабочих параметров подвески; диагностических сигналов системы контроля машины.

Регистрация параметров выполнялась в процессе движения карьерного автосамосвала по исследуемым участкам дорог. Анализ колебаний давления в гидроцилиндрах подвески позволил определить характер изменения динамических нагрузок при прохождении различных типов дорожных дефектов.

На Рис. 4 представлена структура системы мониторинга динамических нагрузок подвески карьерного автосамосвала, использованной для регистрации эксплуатационных параметров в условиях открытых горных работ. Система включает акселерометры, датчики перемещения подвески, датчики давления гидроцилиндров, блок сбора и хранения данных, GNSS-систему синхронизации и программное обеспечение для обработки результатов мониторинга.

Акселерометры, установленные на элементах подвески и раме автосамосвала, обеспечивали регистрацию вертикальных, продольных и поперечных ускорений, возникающих при движении транспортного средства по неровностям дорожного покрытия. Датчики перемещения подвески использовались для контроля хода подвески и определения характера колебательных процессов.

Контроль давления в гидроцилиндрах подвески позволял оценивать изменение эксплуатационных нагрузок при прохождении локальных дорожных дефектов. Все сигналы синхронизировались по времени GNSS-системой мониторинга, что обеспечивало возможность сопоставления динамических нагрузок с координатами дорожных дефектов и параметрами движения автосамосвала.

Полученные данные передавались в программный комплекс для фильтрации, обработки и последующего анализа динамических характеристик подвески карьерного автосамосвала.

Использование системы мониторинга динамических нагрузок подвески обусловлено необходимостью оценки реальных эксплуатационных воздействий, возникающих при движении карьерного автосамосвала по дефектным участкам внутрикарьерных автомобильных дорог.

В условиях открытых горных работ элементы подвески подвергаются интенсивным ударным и вибрационным нагрузкам, вызванным наличием выбоин, колеиности, просадок и других дефектов дорожного покрытия. Длительное воздействие таких нагрузок приводит к ускоренному усталостному износу элементов подвески, снижению эксплуатационного ресурса техники и росту затрат на техническое обслуживание.

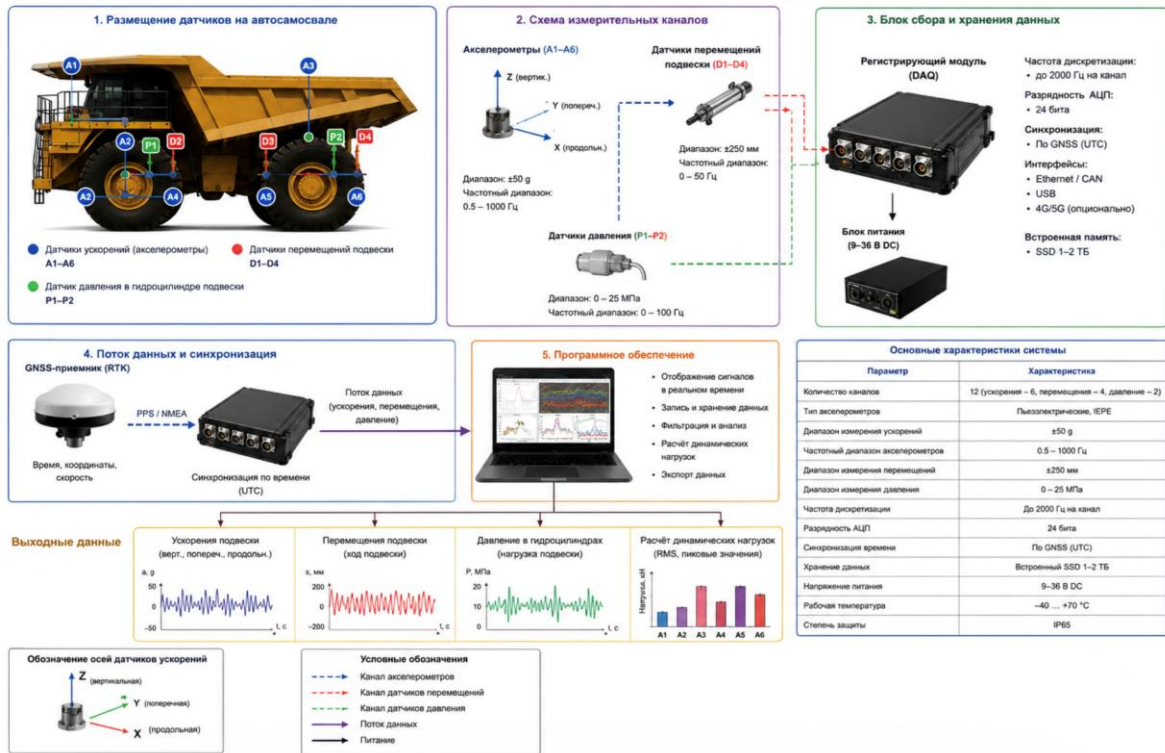


Рис. 4. Система мониторинга динамических нагрузок подвески карьерного автосамосвала

Для оценки динамического воздействия дорожных дефектов была составлена математическая модель в которой рассматривались основные силы сопротивления движению карьерного автосамосвала и параметры ускорений, зарегистрированные в процессе мониторинга.

Сопротивление качению определялось по выражению [7].

$$F_r = mgf, \quad (1)$$

где:

m — масса карьерного автосамосвала;

g — ускорение свободного падения;

f — коэффициент сопротивления качению.

Сопротивление уклону определялось выражением:

$$F_g = mg \sin \alpha, \quad (2)$$

где:

α — угол продольного уклона дороги.

Динамическая составляющая нагрузки определялась по ускорениям, зарегистрированным системой мониторинга:

$$F_d = ma, \quad (3)$$

где:

a — ускорение карьерного автосамосвала при прохождении дорожного дефекта.

При оценке динамического воздействия дорожных дефектов были введены ограничения, связанные с допустимыми режимами движения карьерных автосамосвалов, предельными динамическими нагрузками на элементы подвески, точностью интеллектуальной идентификации дефектов дорожного покрытия, а также устойчивостью моделей искусственного интеллекта при обработке многопараметрических эксплуатационных данных.

Применение комплекса датчиков ускорений, перемещений и давления позволяет выполнять многопараметрический анализ динамических процессов, происходящих в элементах подвески при различных режимах движения автосамосвала. Синхронизация данных с GNSS-мониторингом обеспечивает возможность пространственной привязки динамических нагрузок к конкретным дорожным дефектам и участкам карьерной дороги.

Таким образом, представленная система мониторинга обеспечивает комплексную оценку динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов и является важной частью цифровой методики исследования состояния карьерной транспортной инфраструктуры.

Оценка состояния внутрикарьерных автомобильных дорог выполнялась с применением беспилотных летательных аппаратов и технологий лазерного сканирования.

Для выполнения аэрофотосъемки и LiDAR-сканирования использовался беспилотный летательный аппарат DJI Matrice 300 RTK, оснащенный лазерным сканером Zenmuse L1. Полеты выполнялись в автоматическом режиме по заранее заданным маршрутам с постоянной высотой полета и перекрытием съемки.

Полученные облака точек обрабатывались в программном комплексе Trimble Business Center для построения высокоточных цифровых моделей поверхности карьерных дорог. В процессе исследования выполнялся анализ продольных уклонов, волнообразности дорожного полотна и пространственного распределения дефектов карьерной дороги. По результатам мониторинга были выделены участки с повышенными продольными уклонами и волнообразным профилем дорожной поверхности, оказывающими влияние на скорость движения и динамические нагрузки карьерного автосамосвала.

В результате обработки выполнялось: построение продольных профилей дороги; построение поперечных профилей; определение локальных неровностей; выявление участков колеиности; определение зон просадок и разрушений покрытия.

Все выявленные дефекты привязывались к единой геодезической системе координат, что обеспечивало возможность синхронизации дорожных дефектов с телеметрическими данными карьерного автосамосвала [8-10].

На Рис. 5 представлена структура системы UAV и LiDAR-мониторинга, использованной для цифрового контроля состояния карьерных автомобильных дорог. Система включает беспилотную платформу, LiDAR-сканер, RGB-камеру, систему геодезической привязки, программный комплекс обработки данных и результаты цифрового моделирования дорожной поверхности.

В процессе мониторинга беспилотный летательный аппарат выполнял аэрофотосъемку и лазерное сканирование исследуемых участков карьерной дороги по заранее заданным маршрутам. Полученные данные использовались для формирования облаков точек и цифровых моделей дорожной поверхности, цифровых моделей рельефа, ортофотопланов и продольных профилей дорожной поверхности.

Обработка результатов мониторинга выполнялась с применением алгоритмов фильтрации, классификации облаков точек и построения цифровой модели поверхности дороги. На основе полученных моделей выполнялось выявление локальных дорожных дефектов, включая выбоины, колеиность, просадки и нарушения продольного профиля.

Дополнительно на Рис. 5 представлены примеры анализа геометрических параметров дорожных дефектов, включая определение глубины, длины, ширины и площади повреждений дорожного покрытия. Полученные данные использовались для последующей синхронизации с

телеметрическими параметрами движения карьерного автосамосвала и оценки динамических нагрузок элементов подвески.

Использование UAV и LiDAR-мониторинга обусловлено необходимостью получения высокоточных цифровых данных о состоянии карьерных автомобильных дорог в реальных условиях эксплуатации. Традиционные методы визуального обследования дорог не обеспечивают требуемую точность определения геометрических параметров локальных дефектов и не позволяют выполнять детальный анализ пространственной структуры дорожного покрытия.

Особое значение LiDAR-мониторинг имеет при анализе локальных дорожных дефектов, поскольку позволяет выполнять количественную оценку их параметров, включая глубину, протяженность, объем и перепады высот поверхности. Полученные цифровые модели обеспечивают возможность пространственной привязки дефектов к координатам движения карьерного автосамосвала и синхронизации с данными GNSS-мониторинга и системы контроля подвески [11, 12].

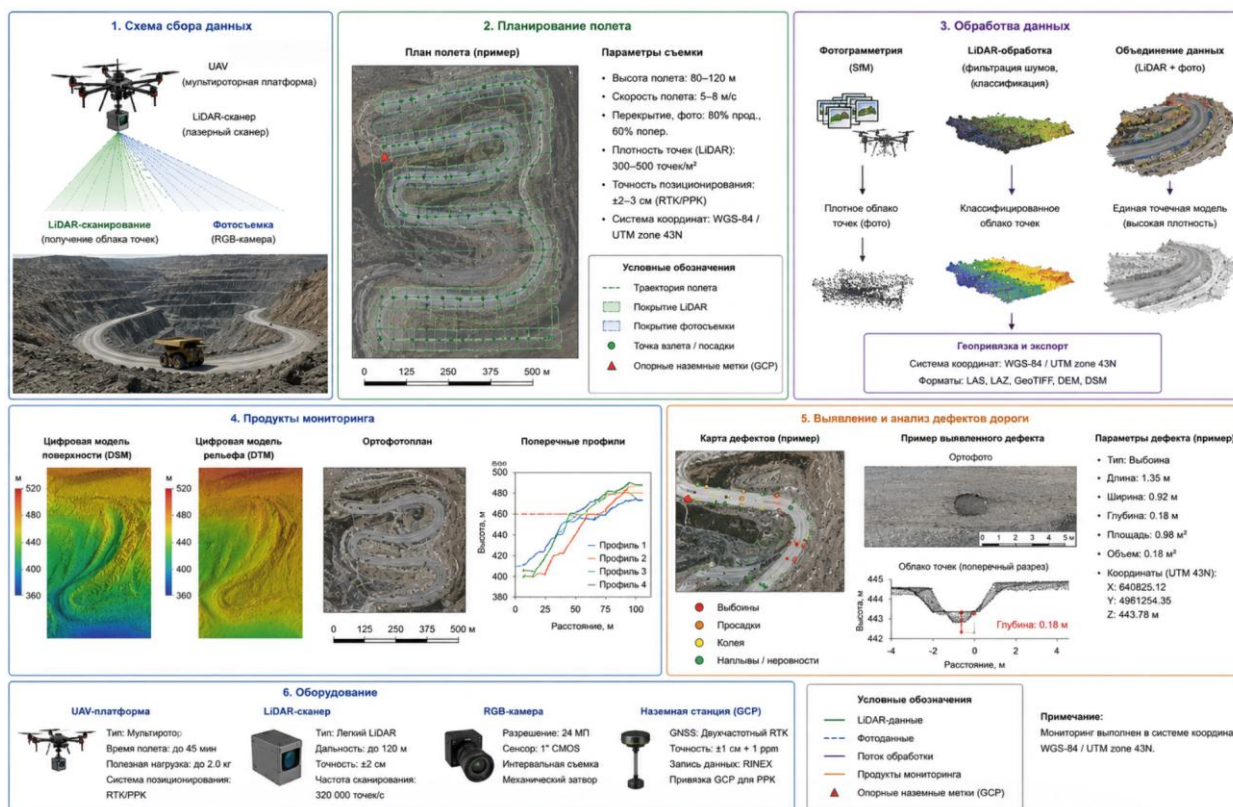


Рис. 5. UAV и LiDAR-мониторинг карьерной дороги

Кроме того, использование UAV-технологий позволяет существенно повысить оперативность обследования карьерных дорог, сократить трудоемкость мониторинга и минимизировать влияние человеческого фактора при оценке технического состояния дорожной инфраструктуры.

Таким образом, представленная система UAV и LiDAR-мониторинга является важным элементом комплексной цифровой методики оценки динамического воздействия дорожных дефектов на элементы подвески карьерных автосамосвалов.

На основе обработки облаков точек была построена трехмерная цифровая модель исследуемого участка дороги.

Полученная цифровая модель позволила определить геометрические параметры дорожных дефектов и оценить степень их влияния на динамические нагрузки карьерного автосамосвала.

В процессе исследования дорожные дефекты классифицировались по следующим типам: выбоины; колеи; волнообразность дорожного покрытия; локальные просадки; разрушение кромки дороги; эрозионные повреждения.

Для каждого дефекта определялись: глубина; длина; ширина; площадь повреждения; перепад высот поверхности.

Классификация дефектов выполнялась с целью определения степени их влияния на динамические нагрузки элементов подвески карьерного автосамосвала [13].

В процессе цифрового мониторинга состояния карьерных автомобильных дорог были выявлены различные типы локальных дефектов дорожного покрытия, оказывающих влияние на динамические нагрузки элементов подвески карьерных автосамосвалов. Основные типы дорожных дефектов представлены на Рис. 7.

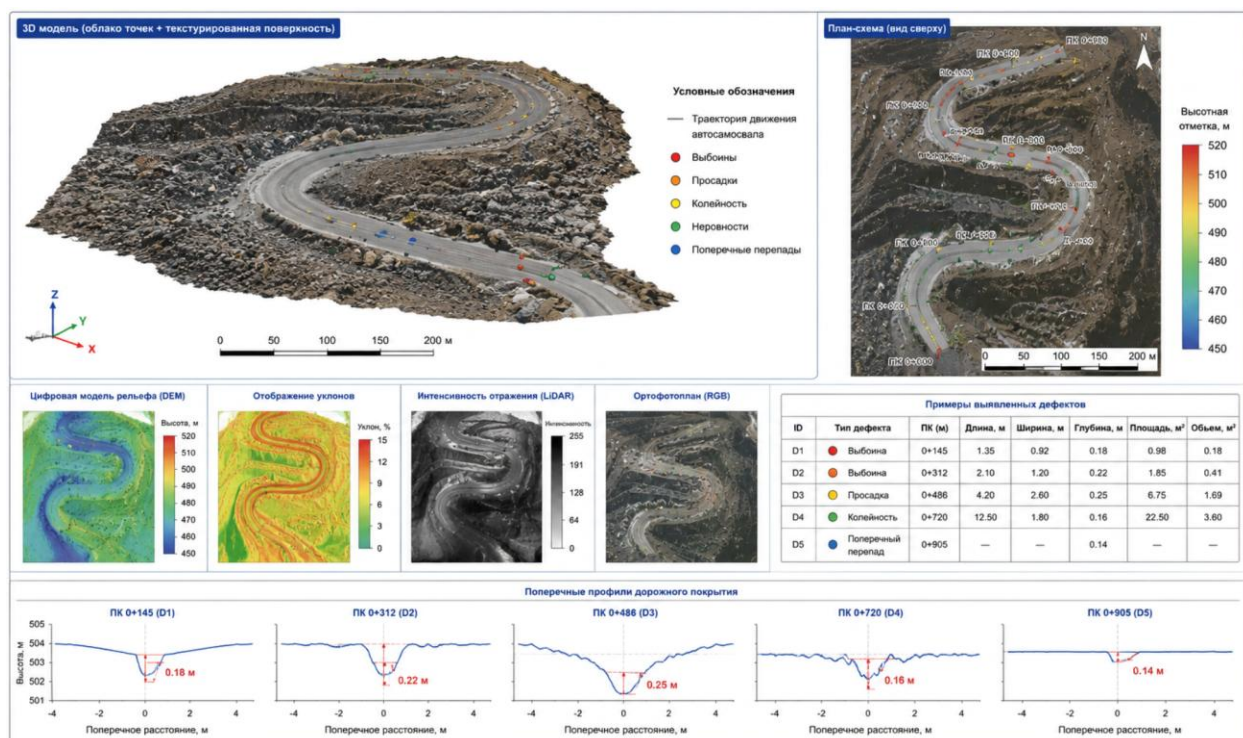


Рис. 6. 3D цифровая модель дорожной поверхности

На Рис. 7 представлены основные типы дорожных дефектов, выявленных в процессе мониторинга состояния карьерных автомобильных дорог. К наиболее распространенным дефектам относятся выбоины, локальные просадки, колеи, наплывы дорожного покрытия, трещины, волнистость, разрушение кромок дороги и нарушения продольного профиля.

Для каждого типа дефекта приведены примеры визуального отображения и схематическое представление геометрических параметров, характеризующих форму и размеры повреждений дорожного покрытия. Основными параметрами дефектов являются глубина, длина, ширина, площадь повреждения и перепад высот поверхности.

Выбоины и локальные просадки характеризуются образованием углублений дорожного покрытия и являются источником значительных ударных нагрузок при движении карьерного

автосамосвала. Колейность формируется в результате многократного воздействия колес транспортных средств и сопровождается увеличением поперечных колебаний подвески.

Волнистость дорожного покрытия и нарушения продольного профиля вызывают периодические динамические воздействия и дополнительные вибрационные нагрузки на элементы подвески. Разрушение кромок дороги и потеря материала покрытия ухудшают устойчивость движения транспортного средства и могут приводить к перераспределению нагрузок между колесными опорами автосамосвала.

Классификация дорожных дефектов необходима для оценки степени их влияния на эксплуатационные параметры карьерного автосамосвала и уровень динамических нагрузок элементов подвески. Различные типы дефектов характеризуются различной геометрией поверхности и по-разному воздействуют на динамику движения транспортного средства.

Наиболее опасными с точки зрения динамического воздействия являются глубокие выбоины, локальные просадки и нарушения продольного профиля дороги, поскольку именно такие дефекты вызывают максимальные вертикальные ускорения и ударные нагрузки при прохождении колес карьерного автосамосвала.

Использование цифровых моделей дорожной поверхности и данных LiDAR-мониторинга позволяет выполнять количественную оценку геометрических параметров дефектов и определять их пространственное расположение. Это обеспечивает возможность синхронизации дорожных дефектов с телеметрическими параметрами движения карьерного автосамосвала и результатами мониторинга динамических нагрузок подвески.

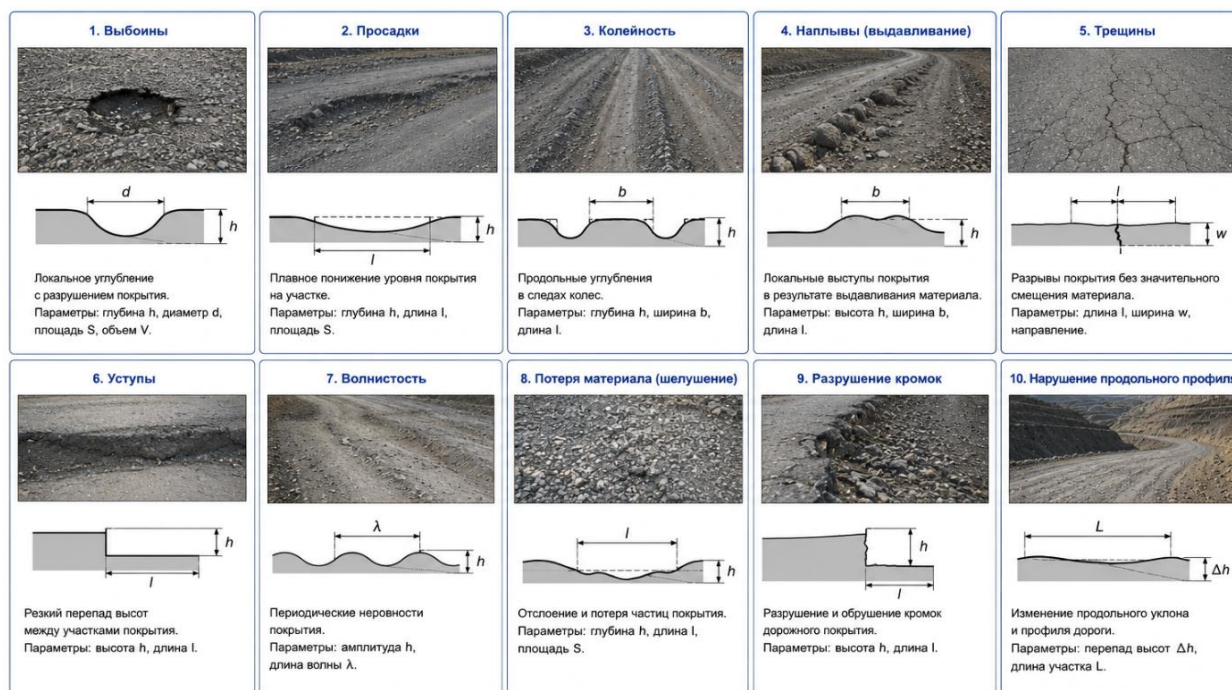


Рис. 7. Основные типы дорожных дефектов карьерных автомобильных дорог

Кроме того, представленная классификация может использоваться при разработке систем автоматизированного мониторинга состояния карьерных дорог, ранжировании участков по степени опасности и планировании ремонтно-восстановительных работ дорожной инфраструктуры.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В результате цифрового мониторинга состояния карьерных автомобильных дорог были выявлены участки с различными типами дефектов дорожного покрытия, характеризующиеся повышенным уровнем динамического воздействия на карьерные автосамосвалы.

Анализ цифровых моделей поверхности дороги показал, что наиболее распространенными дефектами являются локальные выбоины, колейность и нарушения продольного профиля дорожного покрытия. Максимальные значения глубины дефектов наблюдались на участках интенсивного движения груженых автосамосвалов и в зонах повышенного увлажнения дорожного полотна.

Синхронизация телеметрических данных движения автосамосвала с координатами дорожных дефектов позволила выявить тенденцию изменения динамических нагрузок в зависимости от состояния дорожного покрытия. На участках с локальными выбоинами регистрировались максимальные значения вертикальных ускорений и колебаний давления в гидроцилиндрах подвески. Наиболее интенсивные динамические воздействия наблюдались при движении груженого автосамосвала на подъемах, где дополнительное влияние оказывали увеличенная масса транспортного средства и сопротивление уклону.

Полученные результаты подтверждают, что состояние карьерных автомобильных дорог оказывает существенное влияние на эксплуатационную надежность карьерного транспорта. Повышенные динамические нагрузки, возникающие при движении по дефектным участкам дороги, могут приводить к ускоренному усталостному износу элементов подвески, увеличению затрат на техническое обслуживание и снижению эффективности транспортного процесса.

Использование цифрового мониторинга и синхронизированного анализа телеметрических данных позволяет эффективно выявлять наиболее опасные участки дорог и оценивать уровень их воздействия на карьерные автосамосвалы в реальных условиях эксплуатации [14-16].

На Рис. 8 представлена карта локальных дефектов исследуемого участка карьерной автомобильной дороги, построенная по результатам цифрового мониторинга и обработки данных LiDAR-сканирования. На карте отображены пространственное расположение дорожных дефектов, траектория движения карьерного автосамосвала, а также уровень интенсивности повреждений дорожного покрытия.

Выявленные дефекты классифицированы по типу и степени опасности, включая выбоины, локальные просадки, колейность, наплывы покрытия и разрушение кромок дороги. Размер маркеров и цветовая шкала отражают глубину и степень развития дефектов дорожной поверхности.

Наиболее высокая концентрация дефектов наблюдается на участках интенсивного движения груженых карьерных автосамосвалов, а также в зонах изменения продольного профиля дороги и криволинейных сегментах транспортного маршрута.

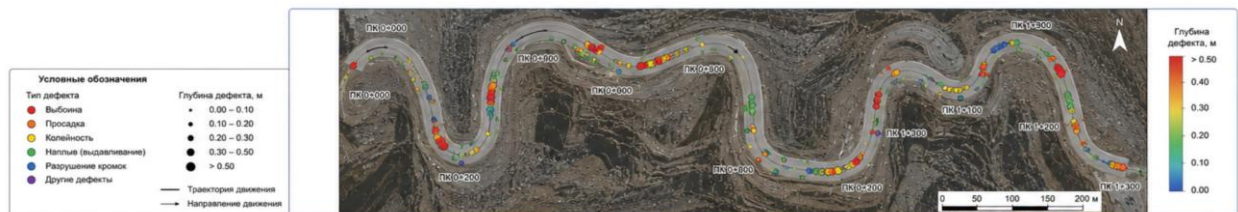


Рис. 8. Карта локальных дефектов карьерной дороги

Построение карты локальных дорожных дефектов необходимо для пространственного анализа состояния карьерной дороги и определения участков повышенного динамического воздействия на элементы подвески карьерного автосамосвала. Использование цифровых координат дефектов

позволяет синхронизировать параметры дорожного покрытия с телеметрическими данными движения транспортного средства и результатами мониторинга динамических нагрузок.

На Рис. 9 представлен продольный профиль исследуемого участка карьерной автомобильной дороги, построенный на основе цифровой модели поверхности, полученной по данным LiDAR-мониторинга. Профиль отражает изменение высотных отметок дорожного покрытия вдоль траектории движения карьерного автосамосвала.

На графике выделены участки с выраженными локальными дефектами, включая выбоины, просадки, колейность и нарушения продольного профиля. Сравнение фактической и проектной поверхности дороги позволило определить зоны отклонения геометрических параметров дорожного покрытия.

Наиболее значительные изменения профиля наблюдаются на участках с интенсивной эксплуатационной нагрузкой, что сопровождается повышенной вероятностью возникновения динамических ударов и вибрационных воздействий.

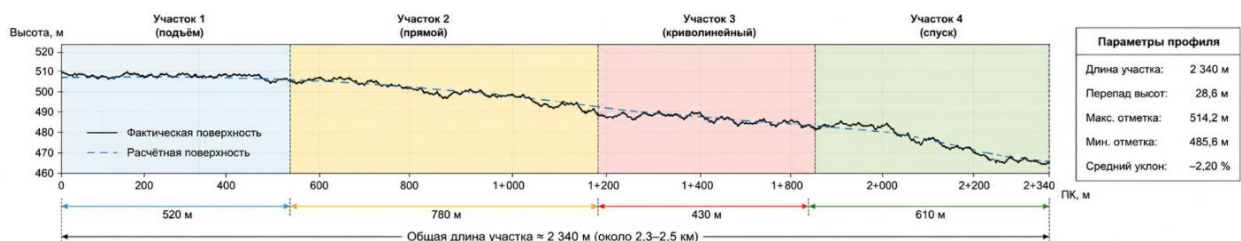


Рис. 9. Продольный профиль карьерной дороги

Продольный профиль дороги используется для оценки геометрического состояния дорожного покрытия и определения участков с повышенным уровнем неровностей. Анализ изменения высотных отметок позволяет выявить зоны потенциального возникновения динамических нагрузок и оценить влияние дорожных дефектов на параметры движения карьерного автосамосвала.

На Рис. 10 представлены результаты мониторинга давления в гидроцилиндрах подвески карьерного автосамосвала при движении по исследуемому участку дороги. Графики отражают изменение эксплуатационных нагрузок в элементах подвески в зависимости от состояния дорожного покрытия.

Рост давления в гидроцилиндрах наблюдается на участках с повышенной неровностью дороги, а также при прохождении локальных дефектов покрытия. Максимальные значения давления зарегистрированы в зонах глубоких выбоин и нарушений продольного профиля.

Колебания давления характеризуют изменение динамических нагрузок и интенсивность вибрационных процессов, возникающих в подвеске карьерного автосамосвала.

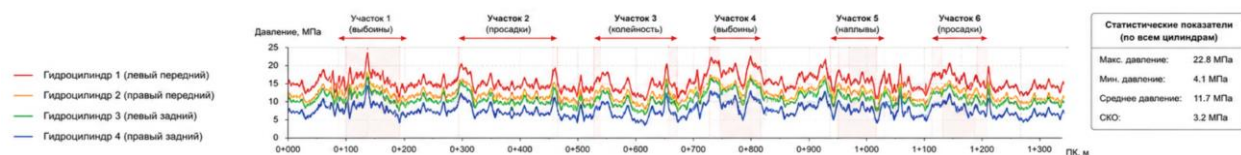


Рис. 10. Изменение давления в гидроцилиндрах подвески

Мониторинг давления в гидроцилиндрах подвески позволяет оценить реальные эксплуатационные нагрузки, возникающие при движении карьерного автосамосвала по дефектным участкам дороги. Анализ изменения давления необходим для определения наиболее нагруженных режимов эксплуатации и оценки степени воздействия дорожных дефектов на элементы подвески.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что техническое состояние внутрикарьерных автомобильных дорог оказывает существенное влияние на формирование динамических нагрузок на подвески карьерных автосамосвалов. Наличие локальных дефектов дорожного покрытия, включая выбоины, просадки, колейность, волнистость и нарушения продольного профиля, сопровождается возникновением интенсивных ударных и вибрационных воздействий, приводящих к увеличению эксплуатационных нагрузок на элементы подвески и несущие конструкции транспортного средства.

Пространственная привязка дефектов участков карьерной дороги к единой системе координат обеспечивает возможность синхронизации данных дорожного мониторинга с параметрами движения карьерного автосамосвала и результатами регистрации динамических нагрузок.

Установлено, что наиболее интенсивные дефекты формируются на участках движения груженых карьерных автосамосвалов, а также в зонах изменения продольного уклона и криволинейных сегментах транспортного маршрута, увеличение глубины дорожных дефектов сопровождается ростом вертикальных ускорений и давления в гидроцилиндрах подвески автосамосвала.

Результаты мониторинга параметров движения карьерного автосамосвала показали, что максимальные значения динамических нагрузок возникают при прохождении участков с глубокими выбоинами и локальными просадками дорожного покрытия. При этом увеличение скорости движения приводит к дополнительному росту амплитуды ускорений и интенсивности ударных воздействий на элементы подвески.

Использование GNSS-навигации совместно с LiDAR-сканированием обеспечивает синхронизацию параметров движения карьерного автосамосвала с цифровой моделью дорожной поверхности и координатами локальных дорожных дефектов [17, 18].

Практическая значимость результатов выполненной работы заключается в возможности применения разработанного подхода для: цифрового мониторинга состояния карьерных автомобильных дорог; оценки уровня динамического воздействия на элементы подвески карьерного транспорта; выявления наиболее опасных участков транспортных маршрутов; прогнозирования эксплуатационных нагрузок; оптимизации скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов; планирования ремонтно-восстановительных работ дорожной инфраструктуры; повышения надежности и безопасности работы горнотранспортных систем.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем мониторинга карьерной транспортной инфраструктуры, цифровых моделей дорожного покрытия и систем поддержки принятия решений в области эксплуатации карьерного транспорта.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка автоматизированных алгоритмов прогнозирования разрушения дорожного покрытия и оценки остаточного ресурса элементов подвески карьерных автосамосвалов с применением методов машинного обучения, искусственного интеллекта и цифровых двойников карьерной транспортной системы.

Литература

1. Tannant, D.D. & Regensburg, B. Guidelines for Mine Haul Road Design. Vancouver: University of British Columbia. 2001. 112 p. DOI: 10.14288/1.0102562.
2. Thompson, R.J. & Visser, A.T. Mine haul road maintenance management systems. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2003. Vol. 103(5). P. 303-312. Available at: <https://www.saimm.co.za/Journal/v103n05p303.pdf>.

3. González, A. & O'Brien, E.J. & Li, Y.Y. & Cashell, K. The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. *Vehicle System Dynamics*. 2008. Vol. 46(6). P. 483-499. DOI: 10.1080/00423110701485050.
4. Kim, D. & Langley, R.B. & Bond, J. & Chrzanowski, A. Local Deformation Monitoring Using GPS in an Open Pit Mine: Initial Study. *GPS Solutions*. 2003. Vol. 7(3). P. 176-185. DOI: 10.1007/s10291-003-0075-1.
5. Choi, Y. & Nguyen, H. & Bui, X.-N. & Nguyen-Thoi, T. Optimization of Haulage-Truck System Performance for Ore Production in Open-Pit Mines Using Big Data and Machine Learning-Based Methods. *Resources Policy*. 2022. Vol. 75. No. 102522. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102522.
6. Choi, Y. & Nieto, A. Optimal Haulage Routing of Off-Road Dump Trucks in Construction and Mining Sites Using Google Earth and a Modified Least-Cost Path Algorithm. *Automation in Construction*. 2011. Vol. 20(7). P. 982-990. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.03.015.
7. Botyan, E.Y. & Lavrenko, S.A. & Pushkarev, A.E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems. *International Journal of Engineering*. 2024. Vol. 37. No. 11. P. 2268-2275. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.11B.12.
8. Fan, C. & Zhang, N. & Jiang, B. & Liu, W.V. Using Deep Neural Networks Coupled with Principal Component Analysis for Ore Production Forecasting at Open-Pit Mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.06.005.
9. Leung, R. & Seiler, K. & Hill, A. & Zhao, X. Data Analytics for Open-Pit Mining: Examining Vehicle Interactions, Material Movement and Compositional Uncertainty with Bucket Inference and Monte Carlo Simulation. 2025. DOI: 10.31224/5972.
10. Hazrathosseini, A. & Moradi, A. Maximizing Mining Operations: Unlocking the Crucial Role of Intelligent Fleet Management Systems in Surface Mining's Value Chain. *Mining*. 2023. Vol. 4(1). P. 7-20. DOI: 10.3390/mining4010002.
11. Liu, S.-Q. & Liu, L. & Kozan, E. & Corry, P. Machine Learning for Open-Pit Mining: A Systematic Review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2024. Vol. 39(1). P. 1-39. DOI: 10.1080/17480930.2024.2362579.
12. Tarazona-Torres, L. & Amaya, C. & Paipilla, A. & Gómez, C. The Parallel Machine Scheduling Problem with Different Speeds and Release Times in the Ore Hauling Operation. *Algorithms*. 2024. Vol. 17(8). No. 348. DOI: 10.3390/a17080348.
13. Yao, J. & Wang, Z. & Chen, H. & Hou, W. & Zhang, X. & Li, X. & Yuan, W. Open-Pit Mine Truck Dispatching System Based on Dynamic Ore Blending Decisions. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(4). No. 3399. DOI: 10.3390/su15043399.
14. Chaowasakoo, P. & Seppälä, H. & Koivo, H. & Zhou, Q. Digitalization of Mine Operations: Scenarios to Benefit in Real-Time Truck Dispatching. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. Vol. 27(2). P. 229-236. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.01.007.
15. Khan, A. & Niemann-Delius, C. Production Scheduling of Open Pit Mines Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Advances in Operations Research*. 2014. Vol. 2014. No. 208502. DOI: 10.1155/2014/208502.
16. Douglas, A. & Langenderfer, M. & Johnson, C. Road Condition Monitoring Utilizing UAV Photogrammetry Aligned to Principal Curve of Mine Haul Truck Path. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023. Vol. 40(1). P. 61-72. DOI: 10.1007/s42461-023-00877-0.
17. Thompson, R.J. & Visser, A.T. Selection and Maintenance of Mine Haul Road Wearing Course Materials. *Mining Technology*. 2006. Vol. 115(4). P. 140-153. DOI: 10.1179/174328606X155138.
18. Benevenuti, F.D. & Peroni, R.L. Detecting Drainage Pitfalls in Open-Pit Mines and Haul Roads Using UAV-Photogrammetry. *DYNA*. 2021. Vol. 88(216). P. 190-195. DOI: 10.15446/dyna.v88n216.90801.