

УДК 622.6

**Пашко Алексей Дмитриевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой механики,  
Технический университет УГМК  
624091, г. Верхняя Пышма,  
пр. Успенский, 3  
e-mail: [a.pashko@tu-ugmk.com](mailto:a.pashko@tu-ugmk.com)

**Великанов Владимир Семенович**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры механики,  
Технический университет УГМК  
e-mail: [rizhik\\_00@mail.ru](mailto:rizhik_00@mail.ru)

**ПРОБЛЕМА РАЗРАБОТКИ  
НАУЧНО-ОБОСНОВАННОЙ  
МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ  
МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ  
ТРАНСПОРТНЫХ ПЛАТФОРМ  
ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Аннотация:*

Одним из основных направлений развития страны является реструктуризация и модернизация парка горно-металлургического оборудования. В статье рассматривается научная проблема, связанная с необходимостью разработки методологических принципов, моделей и алгоритмов для синтеза мобильных автономных транспортных платформ. Ключевая задача заключается в обеспечении соответствия таких платформ комплексу требований: маневренности, надежности восприятия окружающей среды, безопасности взаимодействия, адаптивности и экономической эффективности – особенно в условиях ограниченного пространства. В работе раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы его цель и задачи. Методический аппарат базируется на системном анализе; моделировании сложных динамических систем; классической и современной теории автоматического управления.

Итогом исследования стали практические рекомендации, способные внести вклад в решение актуальной научной проблемы в данной отрасли.

*Ключевые слова:* мобильные автономные платформы, ограниченное пространство.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.032

**Pashko Alexey D.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the Department of Mechanics,  
UMMC Technical University,  
624091 Verkhnyaya Pyshma, 3 Uspensky ave.  
e-mail: [a.pashko@tu-ugmk.com](mailto:a.pashko@tu-ugmk.com)

**Velikanov Vladimir S.**  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Professor of the Department of Mechanics,  
UMMC Technical University  
e-mail: [rizhik\\_00@mail.ru](mailto:rizhik_00@mail.ru)

**THE PROBLEM OF DEVELOPING  
A SCIENTIFICALLY BASED  
METHODOLOGY FOR CREATION  
OF MOBILE AUTONOMOUS TRANSPORT  
PLATFORMS FOR MINING INDUSTRY**

*Abstract:*

One of the main directions of the country's development is the restructuring and modernization of the mining and metallurgical equipment fleet. The article discusses a scientific problem related to the need to develop methodological principles, models and algorithms for the synthesis of mobile autonomous transport platforms. The key task is to ensure that such platforms meet a set of requirements: reliability, reliability of perception of the environment, safety of interaction, adaptability and economic efficiency - especially in conditions of limited space. The paper reveals the theoretical and practical significance of the research, formulates its purpose and objectives. The methodological framework is based on system analysis; modeling of complex dynamic systems; classical and modern theory of automatic control.

The research resulted in practical recommendations that can contribute to solving an urgent scientific problem in this industry.

*Key words:* mobile autonomous platforms, limited space.

*Введение*

Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» предусмотрено достижение национальной цели «Технологическое лидерство», в том числе путем обеспечения технологической независимости, увеличения к 2030 году индекса производства в промышленности не менее чем на 40 процентов по сравнению с уровнем 2022 года [1]. Для достижения национальной цели «Устойчивая и

динамичная экономика» необходимо вхождение к 2030 году Российской Федерации в число 25 ведущих стран мира по показателю плотности роботизации [1]. Кроме того, поставлена цель перехода не менее восьмидесяти процентов российских организаций ключевых отраслей экономики на использование базового и прикладного российского программного обеспечения в системах, обеспечивающих основные производственные и управленческие процессы [1].

Достижение указанных целей невозможно без принципиального обновления методологии проектирования, организации и управления процессом функционирования мобильных автономных транспортных платформ (МАТП) горно-металлургического комплекса. Указанные цели могут быть реализованы на научной основе теоретическими и методологическими средствами обоснования создания МАТП с использованием требований к контролю качества выполняемых технологических процессов.

Мировой рынок автономного горного оборудования быстро растет. Он оценивался в 4,48 млрд долларов в 2024 году и по прогнозам достигнет 11,86 млрд долларов к 2033 году, демонстрируя среднегодовой темп роста 11,6 %. Более узкий сегмент автономных карьерных самосвалов (близкая категория техники) оценивался в 1,12 - 1,7 млрд долларов в 2024 году с прогнозируемым 19 – 25,1 % до 2032 года [2, 3].

По состоянию на конец 2025 года в мире на карьерах работало более 3800 автономных самосвалов, и их парк продолжает расширяться. Регионом-лидером является Азиатско-Тихоокеанский регион, на долю которого в 2024 году приходилось 39 – 49 % мирового рынка. Особенно выделяются Австралия и Китай, где сосредоточено наибольшее количество единиц техники. Северная Америка и Европа также активно внедряют технологии, делая акцент на стандартизации и экологической устойчивости (табл. 1) [2, 3].

Таблица 1

Развитие сегментов рынка автономной горнодобывающей техники

Критерий	Тип оборудования	Уровень автономии	Тип двигателя	Тип работ
Лидирующий сегмент	Автономные самосвалы/тягачи (доля >50 %)	Полуавтономные системы (легче внедряются)	Дизельные (доля >70 %)	Открытые горные работы (доля >80 %)
Самый быстрорастущий сегмент	Автономные буровые установки	Полностью автономные системы	Электрические (включая гибриды)	Подземные горные работы

Автономные погрузочно-доставочные машины (ПДМ) и самосвалы функционируют благодаря комплексу технологий [4, 5]:

- используются лидары, радары, камеры и ультразвуковые датчики для построения 3D-карты пространства в реальном времени.
- основываются на спутниковых системах (GNSS, RTK) с дополнением инерциальными навигационными системами, что критично для подземных работ.
- ИИ-алгоритмы обрабатывают данные с датчиков для принятия решений о маршруте, обнаружения препятствий и управления системами машины.
- техника объединяется в единую сеть через выделенные каналы связи (LTE, 5G) и интегрируется с системами управления предприятием и «цифровыми двойниками».

Драйверами роста автономной горнодобывающей техники являются повышение безопасности (компании сообщают о снижении количества инцидентов до 50 %); рост производительности: автономная техника работает круглосуточно без перерывов, оптимизируя маршруты и скорость, что дает прирост эффективности грузоперевозок от 15 до 34 % и увеличение времени полезной работы; сокращение затрат: снижаются расходы на

оплату труда, топливо (на 20 – 25 %) и техническое обслуживание, что в совокупности уменьшает себестоимость тонны горной массы; дефицит квалифицированных кадров: для удаленных регионов это становится ключевым фактором [4, 5].

Однако существуют и весьма значительные препятствия для внедрения автономной техники: это высокие капитальные затраты (стоимость одного автономного самосвала может в 3 – 4 раза превышать стоимость обычного); сложность интеграции и нормативная неопределенность; социально-экономические последствия (автоматизация ведет к сокращению рабочих мест); кибербезопасность – увеличение доли цифровых систем делает объекты уязвимыми для хакерских атак.

Перспективами развития сегмента автономной горнодобывающей техники являются глубокая автономия и электрификация – тренд смещается к созданию полностью безлюдных рудников. К 2030 году до 30 % операций могут быть автоматизированы. Параллельно растет спрос на электрические и гибридные модели для снижения выбросов; распространение в подземной добыче и на малых предприятиях; развитие технологий позиционирования без GPS открывает путь для автономии под землей. Стандартизация и модульные решения делают технологии доступнее для средних и малых компаний; концентрация рынка и лидерство Китая (доля двух крупнейших производителей – Caterpillar и Komatsu – превышает 37 %). При этом Китай активно развивает собственные технологии и уже имеет самый большой парк автономной техники [4, 5].

Анализ развития производства автономной горнодобывающей техники показывает, что рынок переживает этап зрелого роста, движимый экономикой, безопасностью и господдержкой. Технологии стали надежными, а выгоды – измеримыми.

#### *Исследование*

Сегодня имеется достаточно научно-технической информации в области организации сложных технических систем [6 – 8]. Выполнение заданных объемов работ относится к области производственной эксплуатации, а обеспечение технического состояния МАТП – к технической эксплуатации. Существующая научная проблема связана с отсутствием проверенной методологии проектирования и эксплуатации МАТП. Это затрудняет их эффективное и безопасное применение в условиях ограниченного пространства, где необходимо одновременно учитывать ряд противоречивых требований.

*Высокая маневренность и компактность* – необходимость выполнения сложных траекторных движений в стесненных условиях при ограниченных габаритах платформы.

*Надежность навигации и ситуационной осведомленности* – потребность в достоверном восприятии окружающей среды в условиях

- ограниченной видимости (слабое освещение, запыленность);
- динамически изменяющейся обстановки (перемещение людей, техники, грузов);
- отсутствия стабильной инфраструктуры позиционирования (GPS-сигнал недоступен).

*Гарантированная безопасность взаимодействия* – требование предотвращения коллизий и аварийных ситуаций при

- совместном функционировании нескольких МАТП в едином пространстве;
- пересечении зон работы с людьми и другим транспортом;
- возникновении нештатных ситуаций (отказы датчиков, помехи в каналах связи).

*Адаптивность к разнородным задачам* – необходимость универсальной настройки платформы для выполнения различных операций (буровзрывные работы, выемочные работы, транспортировка, погрузочно-разгрузочные работы, инспекция) в условиях меняющихся требований к грузоподъемности, точности позиционирования и скорости перемещения.

*Технологическая и экономическая целесообразность* – потребность в сбалансированном решении, которое

- минимизирует стоимость аппаратно-программного комплекса;
- обеспечивает приемлемое время автономной работы;
- допускает масштабирование на парк из множества единиц техники.

*Существующие подходы не позволяют комплексно разрешить эти противоречия:*

- алгоритмы планирования траекторий зачастую не учитывают динамику изменений среды;
- сенсорные системы демонстрируют недостаточную надежность в сложных условиях;
- методы координации групп МАТП не гарантируют отсутствие конфликтов при высокой плотности движения;
- стандарты безопасности и сертификации для ограниченного пространства нуждаются в переработке.

### *Результаты исследования*

Таким образом, научная проблема состоит в необходимости разработки методологических принципов, моделей и алгоритмов, обеспечивающих синтез МАТП, которые одновременно удовлетворяют требованиям маневренности, надежности восприятия, безопасности взаимодействия, адаптивности и экономической эффективности в условиях ограниченного пространства.

Критерием оценки решения научной проблемы будет являться комплексная верификация разработанной методологии по совокупности количественных и качественных показателей, отражающих степень удовлетворения пяти ключевых требований к МАТП в ограниченном пространстве (маневренность, надежность, безопасность, адаптивность, экономическая эффективность).

Вышеизложенное позволяет утверждать, что создание методологии синтеза МАТП для горно-металлургической отрасли является актуальной народно-хозяйственной проблемой, ее решение способно обеспечить реализацию национального проекта по достижению технологического суверенитета и увеличению индекса производства промышленности.

Высоко оценивая разносторонний и комплексный вклад российских и зарубежных ученых в историю и теорию исследуемого вопроса, необходимо отметить, что их работы намечают, однако не ограничивают поле деятельности для проведения научных изысканий, так как целый ряд аспектов создания и использования МАТП еще недостаточно рассмотрен и требует детального изучения.

Существующие подходы либо фокусируются на отдельных аспектах (например, маневренности или безопасности), либо не учитывают специфику работы в условиях ограниченного пространства. Это приводит к неоптимальным решениям: избыточным габаритам, высокой стоимости, низкой адаптивности или недостаточной надежности.

Цель исследования – разработать комплексную методологию синтеза МАТП, обеспечивающую сбалансированное выполнение требований маневренности, надежности восприятия, безопасности взаимодействия, адаптивности и экономической эффективности в условиях ограниченного пространства.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Провести системный анализ существующих подходов к проектированию МАТП, выявить их ограничения и пробелы применительно к работе в условиях ограниченного пространства.
2. Сформулировать базовые принципы методологии, определяющие архитектуру, функциональную структуру и ключевые технологические решения для МАТП.
3. Разработать математические модели и алгоритмы:

- планирования траекторий с учетом динамических ограничений пространства;
- мультисенсорной интеграции для надежного восприятия среды в сложных условиях;
- координации группы МАТП и предотвращения коллизий при высокой плотности движения.

4. Создать методику адаптивного управления МАТП, обеспечивающую быструю перенастройку под различные операционные задачи.

5. Разработать методику технико-экономической оценки, позволяющую оптимизировать соотношение затрат и функциональных характеристик МАТП.

6. Провести экспериментальную верификацию методологии на физических и виртуальных моделях, подтвердить достижение целевых показателей эффективности.

В результате проведения исследования получим научный результат в виде целостной методологии, включающей

- систему принципов проектирования МАТП для ограниченного пространства;
- комплекс взаимосвязанных моделей и алгоритмов для реализации ключевых функций;
- алгоритмы адаптивного управления и трансформации;
- критерии и методики оценки и оптимизации технико-экономических показателей.

Практическая значимость предложенной методологии заключается в возможности

- повысить производительность горно-транспортных операций в ограниченном пространстве;
- снизить риски аварий и травматизма за счет автоматизированного контроля безопасности;
- оптимизировать затраты на внедрение и эксплуатацию автономных систем благодаря сбалансированному подбору аппаратно-программных решений.

Перспективы дальнейшего развития исследования связаны с

- экспериментальной апробацией методологии на физических прототипах МАТП;
- разработкой стандартов сертификации для автономных платформ в условиях ограниченного пространства;
- интеграцией предложенных решений в цифровые экосистемы горно-металлургических предприятий (включая системы предиктивной аналитики и цифровых двойников).

### *Заключение*

Предложенная методология представляет собой комплексную систему принципов проектирования, математических моделей, алгоритмов адаптивного управления и методик оценки и оптимизации, обеспечивающую сбалансированное проектирование и эксплуатацию МАТП в условиях ограниченного пространства.

Отличительными особенностями методологии являются комплексность – одновременный учет всех пяти ключевых требований (маневренности, надежности, безопасности, адаптивности, экономической эффективности); адаптивность – способность платформы и системы управления подстраиваться под изменяющиеся условия и задачи без потери производительности; прогностичность – использование моделей прогнозирования для упреждающего выбора режимов работы; масштабируемость – применимость как к одиночным МАТП, так и к группам (паркам) платформ; ориентация на реальное применение – верификация на физических и виртуальных моделях, учет специфики горно-металлургических объектов (пыли, вибраций, перепадов температур, стесненных пространств).

Ее внедрение позволит горно-металлургическому комплексу России укрепить конкурентные позиции на глобальном рынке и приблизиться к достижению национальной цели «Технологическое лидерство», увеличив индекс производства в промышленности, показатель плотности роботизации, и осуществить переход на использование базового и прикладного российского программного обеспечения в системах, обеспечивающих основные производственные и управленческие процессы.

### Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата обращения 20.01.2026)
2. Grand View Research: «Autonomous Mining Equipment Market Report, 2025-2033» (Аналитический отчет). URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/autonomous-mining-trucks-market> (дата обращения 20.01.2026)
3. Fortune Business Insights: «Autonomous Earthmoving Equipment Market, 2025-2032» (Аналитический отчет). URL: <https://www.globaldata.com/store/report/development-of-autonomous-trucks-in-mining-market-analysis/> (дата обращения 20.01.2026)
4. IM Mining: «Tonly & EACON launch cableless, electric & autonomous EQ100E truck» (Аналитический отчет). URL: <http://www.gruzovikpress.ru/article/25573-avtonomniy-gruzovoy-avtotransport-na-elektrotyage-dekarbonizatsiya-gruzovogo-transporta-ch-4/> (дата обращения 20.01.2026)
5. Megaproject / International Mining: «Eacon Mining Fleet Surpasses 800 Travelling >27 Million Kilometres Autonomously» (Декабрь 2024) (Аналитический отчет). URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/autonomous-mining-truck-market> (дата обращения 20.01.2026)
6. Смирнов Г.А., 1990. *Теория движения колёсных машин*. Москва: Машиностроение, 352 с.
7. Фурунжиев Р.И., Муравьев А.А., 2015. *Проектирование мобильных роботов: методы и алгоритмы*. Москва: Машиностроение, 416 с.
8. Лакота Н. А., Рудианов Н.А., Хрущёв В.В., 2018. *Управление мобильными роботами и робототехническими системами*. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 384 с.
9. Глебов А.В., 2025. Проблемы обеспечения технологического суверенитета горнодобывающей промышленности. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 28 – 35. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.028
10. Ростехнадзор. *Статистические данные о производственном травматизме за 2020-2022 годы*. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
11. *Правила по охране труда при работе в ограниченных и замкнутых пространствах* (утв. приказом Минтруда России от 15 декабря 2020 г. N 902н). URL: [https://rzot.ru/files/npa/PrikazMinTrudaN902n\\_15122020.pdf](https://rzot.ru/files/npa/PrikazMinTrudaN902n_15122020.pdf) (дата обращения 15.10.2026)
12. Карпушин А.В., Фролов М.С., 2022. Экономика цифровой трансформации горного предприятия: оценка потерь от простоев. *Горный журнал*, № 5, С. 67–73.
13. Головань В.И., Семенов Д.А., 2021. Моделирование динамики мобильного робота в средах со сложным рельефом. *Инженерный вестник*, № 4, С. 45–52.
14. Brooks R.A., 1986. A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, № 1, P. 14–23.
15. Thrun S., Burgard W., Fox D., 2005. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 647 p.
16. Pfeiffer M., Haghani T., 2023. Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 37, № 3, P. 189–215.
17. Khamis A., Jiang J., 2022. Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 28, P. 100354.

## References

1. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 07.05.2024 g. № 309 "O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda" [Decree of the President of the Russian Federation dated 05/07/2024 No. 309 "On the National Development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036"]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (data obrashcheniya 20.01.2026)
2. *Grand View Research: «Autonomous Mining Equipment Market Report, 2025-2033» (Аналитический отчет)*. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/autonomous-mining-trucks-market> (data obrashcheniya 20.01.2026)
3. *Fortune Business Insights: «Autonomous Earthmoving Equipment Market, 2025-2032» (Аналитический отчет)*. URL: <https://www.globaldata.com/store/report/development-of-autonomous-trucks-in-mining-market-analysis/> (data obrashcheniya 20.01.2026)
4. *IM Mining: «Tonly & EACON launch cableless, electric & autonomous EQ100E truck» (Аналитический отчет)*. URL: <http://www.gruzovikpress.ru/article/25573-avtonomniy-gruzovoy-avtotransport-na-elektrotyage-dekarbonizatsiya-gruzovogo-transporta-ch-4/> (data obrashcheniya 20.01.2026)
5. *Megaproject / International Mining: «Eacon Mining Fleet Surpasses 800 Travelling >27 Million Kilometres Autonomously» (Dekabr' 2024) (Аналитический отчет)*. URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/autonomous-mining-truck-market> (data obrashcheniya 20.01.2026)
6. Smirnov G.A., 1990. *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [Theory of movement of wheeled vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 352 p.
7. Furunzhiev R.I., Murav'ev A.A., 2015. *Proektirovanie mobil'nykh robotov: metody i algoritmy*. [Designing mobile robots: methods and algorithms]. Moscow: Mashinostroenie, 416 p.
8. Lakota N. A., Rudyanov N.A., Khrushchev V.V., 2018. *Upravlenie mobil'nymi robotami i robototekhnicheskimi sistemami* [Management of mobile robots and robotic systems]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 384 p.
9. Glebov A.V., 2025. *Problemy obespecheniya tekhnologicheskogo suvereniteta gornodobyvayushchei promyshlennosti* [Problems of ensuring the technological sovereignty of the mining industry]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 28 – 35. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.028
10. Rostekhnadzor. *Statisticheskie dannye o proizvodstvennom travmatizme za 2020-2022 gody* [Rostekhnadzor. Statistical data on occupational injuries for the years 2020-2022]. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (data obrashcheniya 15.10.2023).
11. *Pravila po okhrane truda pri rabote v ogranichennykh i zamknytykh prostranstvakh (utv. prikazom Mintruda Rossii ot 15 dekabrya 2020 g. N 902n)* [Rules on labor protection when working in confined and confined spaces (approved by Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation dated December 15, 2020 No. 902n)]. URL: [https://rzot.ru/files/npa/PrikazMinTrudaN902n\\_15122020.pdf](https://rzot.ru/files/npa/PrikazMinTrudaN902n_15122020.pdf) (data obrashcheniya 15.10.2026)
12. Karpushin A.V., Frolov M.S., 2022. *Ekonomika tsifrovoi transformatsii gornogo predpriyatiya: otsenka poter' ot prostoev* [Economics of digital transformation of a mining enterprise: assessment of losses from downtime]. *Gornyi zhurnal*, № 5, P. 67–73.
13. Golovan' V.I., Semenov D.A., 2021. *Modelirovanie dinamiki mobil'nogo robota v sredakh so slozhnym rel'efom* [Simulation of mobile robot dynamics in environments with complex terrain]. *Inzhenernyi vestnik*, № 4, P. 45–52.
14. Brooks R.A., 1986. *A Robust Layered Control System For A Mobile Robot*. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, № 1, P. 14–23.
15. Thrun S., Burgard W., Fox D., 2005. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 647 p.
16. Pfeiffer M., Haghani T., 2023. *Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis*. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 37, № 3, P. 189–215.
17. Khamis A., Jiang J., 2022. *Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions*. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 28, P. 100354.