

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИТУАЦИОННО-АДАПТИВНЫХ
МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОГРАНИЧЕННЫХ
ПРОСТРАНСТВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСАПашко А.Д.¹, Великанов В.С.^{1,2}, Булганина М.Ю.²¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В горно-металлургическом комплексе (ГМК) работы в ограниченных пространствах (подземные выработки, технологические аппараты, коммуникации) сопряжены с высоким травматизмом (смертность в 3–5 раз выше среднепромышленной) и значительными экономическими потерями из-за простоев оборудования (20–30% фонда времени). Существующие роботизированные решения недостаточно адаптированы к условиям сенсорного вакуума, запылённости и динамическим изменениям среды. Целью работы является разработка концептуальных основ, архитектуры и научно-методического аппарата (включая формальные модели) для создания ситуационно-адаптивных мобильных автономных платформ (САМП), предназначенных для безопасного и эффективного выполнения задач в ограниченных пространствах ГМК. В качестве методов исследования использован системный анализ статистики травматизма и экономических потерь, методология FMEA для формализации требований, имитационное моделирование в цифровых двойниках (Unity, Unreal Engine с PhysX), лабораторное прототипирование на стендах «искусственная шахта» и «термобарокамера», а также полевые испытания на промышленных объектах. Научная новизна заключается в предложении концепции САМП на принципах модульности, контекстной автономности и глубокой киберфизической интеграции; в разработке гибридной модели SLAM для навигации в условиях сенсорного вакуума (ошибка позиционирования 0,8 м на 500 м против 4,2 м при использовании только лидара) и модели энергопотребления с оптимизацией затрат на топливо и деградацию аккумулятора. В результате систематизированы типовые ограниченные пространства ГМК, формализованы требования к платформам. Показано, что внедрение САМП позволяет снизить травматизм в целевых операциях на 70–90%, повысить производительность на 15–25%, сократить затраты на ремонт на 25–40%. Срок окупаемости парка из пяти платформ составляет 2,5–3 года. Практическая значимость состоит в предоставлении предприятиям ГМК структурированной методологии перехода к роботизации работ в ограниченных пространствах. Направления дальнейшего развития включают экспериментальную валидацию на полноразмерных прототипах, разработку самообучающихся алгоритмов семантического анализа дефектов и создание отраслевых стандартов обмена данными с цифровыми двойниками.

Ключевые слова: мобильная автономная платформа, ограниченное пространство, горно-металлургический комплекс, ситуационная адаптивность, математическая модель, совокупная стоимость владения, промышленная безопасность

© Пашко А.Д., Великанов В.С., Булганина М.Ю., 2026

Для цитирования

Пашко А.Д., Великанов В.С., Булганина М.Ю. Разработка концепции ситуационно-адаптивных мобильных автономных платформ для ограниченных пространств горно-металлургического комплекса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-5-13>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF SITUATION-ADAPTIVE MOBILE AUTONOMOUS PLATFORMS FOR CONFINED SPACES IN THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

Pashko A.D.¹, Velikanov V.S.^{1,2}

¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. In the mining and metallurgical industry (MMI), operations in confined spaces (underground workings, process equipment, and utility systems) are associated with a high incidence of occupational injuries (mortality rates 3-5 times higher than the industrial average) and significant economic losses due to equipment downtime (20-30% of the available operating time). Existing robotic solutions are insufficiently adapted to conditions characterized by sensor-deprived environments, high dust levels, and dynamic changes in the operating environment. The aim of this study is to develop the conceptual foundations, architecture, and scientific and methodological framework (including formal models) for the creation of situation-adaptive mobile autonomous platforms (SAMPs) designed to perform tasks safely and efficiently in confined spaces within the MMI. The research methods include a systematic analysis of occupational injury statistics and economic losses, the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) methodology for formalizing requirements, simulation modeling using digital twins (Unity and Unreal Engine with PhysX), laboratory prototyping on “artificial mine” and “thermobaric chamber” test benches, and field testing at industrial facilities. The scientific novelty lies in proposing the concept of SAMPs based on the principles of modularity, contextual autonomy, and deep cyber-physical integration; developing a hybrid SLAM model for navigation in sensor-deprived environments (a positioning error of 0.8m over 500m compared with 4.2m when using lidar alone); and developing an energy consumption model that optimizes fuel costs and battery degradation. As a result, typical confined spaces in the MMI have been systematized and requirements for the platforms have been formalized. It is demonstrated that the implementation of SAMPs can reduce occupational injuries in target operations by 70-90%, increase productivity by 15-25%, and reduce repair costs by 25-40%. The payback period for a fleet of five platforms is estimated at 2.5-3 years. The practical significance of the study lies in providing MMI enterprises with a structured methodology for transitioning to robotic execution of operations in confined spaces. Further development should include experimental validation using full-scale prototypes, development of self-learning algorithms for semantic defect analysis, and the establishment of industry-specific standards for data exchange with digital twins.

Keywords: mobile autonomous platform, confined space, mining and metallurgical industry, situation adaptivity, mathematical model, total cost of ownership, industrial safety

For citation

Pashko A.D., Velikanov V.S., Bulganina M.Yu. Development of the Concept of Situation-Adaptive Mobile Autonomous Platforms for Confined Spaces in the Mining and Metallurgical Industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-5-13>

Введение

Современный горно-металлургический комплекс (ГМК), оставаясь фундаментом экономики, сталкивается с комплексом взаимоусиливающих вызовов. Согласно данным Ростехнадзора, подземная добыча полезных ископаемых в России сохраняет один из наиболее высоких уровней профессионального риска: доля смертельного травматизма в данной отрасли в 2020–2022 годы в 3–5 раз превышала средние показатели по промышленности в целом. Параллельно с вызовами безопасности нарастает экономическое давление: эксплуатация глубоководных и геологически сложных месторождений ведет к росту себестоимости, а дефицит квалифицированных кадров для работы в опасных условиях становится критическим ограничителем развития.

Ключевым технологическим барьером является отсутствие эффективных средств для выполнения операций мониторинга, диагностики и ремонта в ограниченных и опасных пространствах (ОП), к которым относятся подземные выработки, технологические аппараты (доменные печи, конвертеры, бункеры-накопители) и инфраструктурные коммуникации [3]. Присутствие человека в таких контурах сопряжено с запредельным риском, а организация безопасного доступа требует масштабных производственных работ, приводящих к значительным производственным потерям. По экспертным оценкам, совокупные потери времени, связанные только с процедурами обеспечения безопасного доступа персонала в «слепые зоны» и зоны повышенной опасности, могут достигать 20–30% от потенциально доступного фонда

рабочего времени на глубоких горизонтах. Таким образом, формируется системное противоречие: между объективной операционной необходимостью в постоянном контроле и вмешательстве в ОП и физической, экономической, а также технической невозможностью или крайней неэффективностью использования для этих целей традиционных методов.

Анализ существующих решений – от универсальных исследовательских роботов до специализированной автономной техники лидеров рынка (Sandvik, Epiroc) – показывает их недостаточную адаптацию к комплексным условиям ГМК [4-6].

Можно выделить следующие недостатки известных конструкций (существующих роботизированных решений), которые делают их недостаточно адаптированными к условиям ГМК:

1. Неустойчивость навигационных алгоритмов в динамических, запылённых и лишённых ориентиров средах (сенсорный вакуум). Как следствие, ошибка позиционирования при использовании только лидера достигает 4,2 м на 500 м, что неприемлемо для точных операций.

2. Отсутствие платформ, способных адаптировать свою морфологию под различные классы задач (модульность). Существующие решения, как правило, узкоспециализированы и не позволяют быстро менять конфигурацию для работы в разных типах ограниченных пространств (подземные выработки, технологические аппараты, инфраструктурные объекты).

3. Слабая интеграция роботов в контур цифрового двойника предприятия как равноправных киберфизических компонентов. Большинство систем работают изолированно, без двустороннего обмена данными с моделями среды и процессами планирования.

4. Недостаточная адаптация к комплексным условиям ГМК в целом, включая высокую запылённость, отсутствие GPS, динамические изменения среды (обвалы, подвижки грунта, изменение рельефа), экстремальные температуры (в технологических аппаратах до $>900^{\circ}\text{C}$), наличие токсичных и взрывоопасных газов.

5. Отсутствие платформ с гибридными энергосистемами (аккумулятор + генератор), оптимизирующими расход топлива и деградацию батареи для длительной автономной работы.

Неспособность эффективно выполнять задачи в «слепых зонах» и зонах повышенной опасности без предварительных масштабных подготовительных работ, что ведёт к высоким простоям оборудования (20–30% фонда времени).

Таким образом, основные претензии к известным конструкциям – это низкая точность навигации в сенсорном вакууме, отсутствие модульности и киберфизической интеграции, а также неадаптированность к специфическим опасностям горно-металлургического комплекса.

Целью данного исследования является разработка концептуальных основ, архитектуры и научно-методического аппарата, включая формальные моде-

ли, для проектирования мобильных автономных платформ нового поколения, способных к ситуационной адаптации для безопасного и эффективного выполнения задач в ограниченных пространствах ГМК.

Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В качестве методологического каркаса предложена концепция ситуационно-адаптивной мобильной платформы (САМП). Её суть – переход от создания изолированных, «закрытых» робототехнических устройств к проектированию открытой экосистемы модульных средств, конфигурируемых под конкретный класс пространств (ситуацию) и задачу (адаптивность).

Принципы и архитектура. Концепция базируется на трех взаимосвязанных принципах:

1. *Модульность:* платформа проектируется как сборка совместимых модулей: базового шасси (B), энергетического блока (P), центрального вычислительного модуля (C) и сменных модулей полезной нагрузки (M_i). Унифицированный интерфейс обеспечивает выполнение условия быстрой конфигурации. Критерий оптимальной конфигурации системы можно выразить формулой

$$C_{\text{опт}} = \operatorname{argmin}[T(B + P + C + M_i) \rightarrow \text{Goal}], \quad (1)$$

где $C_{\text{опт}}$ – оптимальная конфигурация системы; argmin – оператор поиска аргумента, при котором выражение T достигает минимума (от англ. argument of minimum); B – затраты на создание базового шасси; P – затраты на создание энергетического блока; C – затраты на создание центрального вычислительного модуля; M_i – затраты на создание сменных модулей полезной нагрузки; Goal – целевая установка (желаемый результат, критерий оптимизации).

2. *Контекстная автономность:* автономность понимается как способность системы к семантическому пониманию среды и перепланированию на основе иерархии целей:

$$G = \{G_{\text{стратег}}, G_{\text{такт}}, G_{\text{реакт}}\}, \quad (2)$$

где G – вектор целей/задач системы управления; $G_{\text{стратег}}$ – стратегический уровень целей (долгосрочные задачи, глобальные маршруты, бизнес-показатели); $G_{\text{такт}}$ – тактический уровень (среднесрочное планирование: маршруты, приоритеты, распределение ресурсов); $G_{\text{реакт}}$ – реактивный уровень (оперативное реагирование на изменения среды: обход препятствий, коррекция движения).

Управление реализуется по гибридной схеме «Human-on-the-Loop», где оператор задает стратегические цели и ограничения $G_{\text{стратег}}$, а тактическое $G_{\text{такт}}$ и реактивное $G_{\text{реакт}}$ планирование делегируются бортовому искусственному интеллекту (ИИ). Роль человека-оператора и бортового ИИ в схеме «Human-on-the-

Loop» сводится к следующему:

- Человека-оператор:
 - задаёт *стратегические рамки* (например, «доставить груз в точку X за 2 ч с минимальным энергопотреблением»);
 - контролирует безопасность и соответствие целям;
 - вмешивается только при нештатных ситуациях или смене стратегии.
- Бортовой ИИ:
 - самостоятельно формирует *тактические планы* (например, выбор пути с учётом текущих препятствий);
 - обеспечивает *реактивное управление* (мгновенная коррекция траектории, стабилизация платформ);
 - адаптируется к динамическим изменениям среды без участия оператора.

Преимуществами такого подхода являются снижение нагрузки на оператора, повышение скорости реакции на внештатные ситуации, сохранение человеческого контроля над ключевыми решениями, баланс между автономностью и управляемостью системы.

3. *Глубокая киберфизическая интеграция*: САМП выступает как активный агент $A_{\text{робот}}$ в системе цифрового двойника предприятия. Обеспечивается двусторонний обмен данными по следующим принципам:

- Обновление цифрового двойника:

$$DT(t + \Delta t) = f\left(DT(t), \sum Data(A_{\text{робот}})\right), \quad (3)$$

где $DT(t)$ – состояние цифрового двойника в момент времени t ; Δt – шаг моделирования/обновления; $\sum Data(A_{\text{робот}})$ – агрегированные данные, поступающие от робота (телеметрия, сенсорные данные, статус задач); f – функция эволюции состояния цифрового двойника (моделирует динамику системы с учётом входных данных).

- Формирование команд для робота:

$$Cmd(A_{\text{робот}}) = g(DT, Goal), \quad (4)$$

где $Cmd(A_{\text{робот}})$ – команды управления, передаваемые роботу; DT – актуальное состояние цифрового двойника (включая прогнозные сценарии); $Goal$ – целевые установки (задачи миссии, ограничения, приоритеты); g – функция принятия решений (на основе анализа DT и целей).

САМП действует как автономный агент $A_{\text{робот}}$, интегрированный в цифровую экосистему предприятия [8]. Цифровой двойник (ЦД) выполняет роль виртуального репрезентанта физической системы, объединяя данные от роботов, оборудования и процессов. Двусторонний обмен обеспечивает прямую связь (робот передаёт данные в ЦД для актуализации моде-

ли) и обратную связь (ЦД генерирует команды для робота на основе анализа ситуации и целей) [8].

Робот отправляет в ЦД структурированные данные (координаты и ориентацию, параметры работоспособности (температура, заряд, нагрузки), информацию об окружающей среде (препятствия, изменения ландшафта) и на этом этапе производится агрегация данных. На основе $DT(t)$ и данных робота система проводит прогностическое моделирование, прогнозируя эволюцию состояния ($DT(t+\Delta t)$), выявляет риски (столкновения, перегрузки) и оптимизирует ресурсы (энергия, время). На основе результатов моделирования функция g формирует управляющие воздействия (корректировку маршрута, изменение режимов работы, активацию аварийных процедур).

Преимуществами интеграции являются повышение ситуационной осведомлённости за счёт объединения данных, возможность предиктивного управления (предвосхищение проблем), масштабируемость (подключение множества агентов $A_{\text{робот}}$ к единому ЦД), снижение нагрузки на оператора (автоматизированная координация).

Математические модели ключевых подсистем. Модель навигации в условиях сенсорного вакуума. Для позиционирования в отсутствие GPS предлагается гибридная модель по методу одновременной локализации и построению карты (SLAM) (от англ. Simultaneous Localization and Mapping), объединяющая данные от лидара, стереокамеры и инерциального измерительного блока (IMU) (от англ. Inertial Measurement Unit) [9].

Состояние системы в дискретный момент k описывается вектором:

$$x_k = \begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ v_k \\ \omega_k \\ m \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

где p_k – позиция (координаты в 3D-пространстве); q_k – ориентация, заданная кватернионом (четырёхмерный вектор $[q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ нормированный: $\|q_k\|=1$); v_k – линейная скорость; ω_k – угловая скорость; m – карта ориентиров (набор точек/объектов с известными координатами в глобальной системе).

На основе показаний IMU (u_k – вектор измерений акселерометров и гироскопов) состояние прогнозируется:

$$x_{k|k-1} = f(x_{k-1}, u_k) + w_k, \quad (6)$$

где $x_{k|k-1}$ – предсказанное состояние в момент k на основе данных до $k-1$; f – нелинейная функция пере-

хода, интегрирующая ускорения и угловые скорости (например, с использованием кватернионной кинематики и численного интегрирования) [4]; w_k – шум процесса (гауссовский, с ковариацией Q_k), учитывающий погрешности модели и датчиков.

Корректировка предсказания выполняется по данным лидара (камеры) (z_k):

$$z_k = h(x_{k|k-1}) + v_k, \quad (6)$$

где z_k – вектор наблюдений (например, расстояния до ориентиров, пиксельные координаты объектов); h – функция проецирования состояния в пространство измерений (учитывает модель камеры, лидара и геометрию сцены)[6]; v_k – шум измерений (гауссовский, с ковариацией R_k).

Модель энергопотребления и автономности. Время работы системы T_w определяется запасом энергии в батарее E_b и суммарным энергопотреблением:

$$E_b = \int_0^{T_w} (P_m(t) + P_c(t) + P_p(t)) dt, \quad (7)$$

где $P_m(t)$ – мощность, затрачиваемая на движение; $P_c(t)$ – мощность вычислительного модуля; $P_p(t)$ – мощность полезной нагрузки.

Мощность, необходимая для движения, зависит от кинематических и динамических параметров:

$$P_m = k_1 \cdot v^3 + k_2 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v, \quad (8)$$

где V – скорость движения, м/с; m – масса платформы, кг; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²); α – угол уклона поверхности, рад; k_1 , k_2 – коэффициенты, учитывающие аэродинамическое сопротивление и механические потери.

Физический смысл слагаемых: $k_1 \cdot v^3$ – энергия на преодоление аэродинамического сопротивления (пропорциональна кубу скорости); $k_2 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v$ – энергия на подъём/спуск по уклону (пропорциональна силе тяжести и скорости).

Для гибридной энергосистемы (аккумулятор + генератор) затраты на энергию C_e за путь длиной L минимизируются и определяются как

$$C_e = \min_{v_t, P_g(t)} \left[c_f \cdot \int_0^T P_g(t) dt + c_b \cdot \Delta DOD \right], \quad (9)$$

где c_f – стоимость топлива, руб./Вт·ч; $P_g(t) dt$ – мощность генератора в момент t , Вт; c_b – удельная стоимость деградации аккумулятора, руб./%; ΔDOD

– глубина разряда (% от номинальной ёмкости), влияющая на срок службы батареи [12].

Модель позволяет планировать работы с минимизацией затрат на топливо и замену аккумуляторных батарей (АКБ), адаптировать скорость $v(t)$ под рельеф (α) и нагрузку, балансировать между использованием генератора и АКБ для продления срока службы батареи, оценивать экономическую эффективность гибридных энергосистем в сравнении с чисто аккумуляторными.

К примеру, для транспортировки груза по маршруту длиной $L=10$ км с подъемами и спусками под уклоном $\alpha=5^\circ$ система оптимизирует скорость $v(t)$, снижая её на подъёмах для уменьшения P_m , мощность генератора $P_g(t)$, активируя его только при глубокой разрядке АКБ ($\Delta DOD > 70\%$). В результате удастся достигнуть снижения затрат на энергию C_e на 15–20% по сравнению с фиксированным режимом работы.

Методы проектирования и испытаний. Верификация концепции и алгоритмов осуществляется через цикл:

– виртуальное моделирование в цифровых двойниках на основе игровых движков (Unity, Unreal Engine) с физическими плагинами (NVIDIA PhysX). Создаются высокодетализированные модели типовых сред ГМК с параметризуемыми помехами (запыленность, освещенность);

– аппаратно-программное моделирование на масштабных прототипах в условиях лабораторных стендов «искусственная шахта» и «термобарокамера»;

– полевые испытания на действующих промышленных объектах по регламентированным протоколам.

Краткое описание базовой конструктивной схемы САМП.

Платформа построена по модульному принципу и состоит из следующих основных унифицированных узлов:

- Базовое шасси (В) – гусеничное (либо колёсное) исполнение с независимой подвеской, обеспечивающее:
 - клиренс не менее 200 мм для преодоления завалов и порогов;
 - угол преодолеваемого подъёма до 35° ;
 - степень защиты IP67 (полная пыленепроницаемость, защита от погружения в воду);
 - рабочий диапазон температур от -40 до $+120^\circ\text{C}$ (для версии без термоизоляции).
- Энергетический блок (Р) – гибридная система:
 - литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея (ёмкость 10–20 кВт·ч) с системой управления (BMS);
 - газовый (или дизельный) генератор мощностью 5–10 кВт для подзарядки на длительных маршрутах и питания полезной нагрузки;
 - топливный бак объёмом 15–30 л.
- Центральный вычислительный модуль (С) – промышленный контроллер реального времени (Intel Core i5/i7 industrial или ARM-базированный с аппаратным ускорителем AI):

- объём оперативной памяти 16–32 ГБ;
- твердотельный накопитель 1 ТБ для хранения карт и телеметрии;
- интерфейсы: Gigabit Ethernet, CAN, RS-485, Wi-Fi 6, 4G/5G.

• Сменные модули полезной нагрузки (Mi) – быстросъёмные (байонетное или магнитное крепление) блоки с единым электрическим и коммуникационным интерфейсом. Предусмотрены типовые исполнения:

- диагностический – лазерный сканер, газоанализатор, тепловизор;
- транспортный – грузовая платформа грузоподъёмностью до 200 кг;
- ремонтный – манипулятор с двумя степенями свободы и сменными рабочими органами;
- аварийно-спасательный – лебёдка, раздвижные опоры.

• Сенсорная система (входит в состав шасси и вычислительного модуля):

- 2× лидара (LIDAR) – основной и резервный (дальность 30–50 м, угол 270°);
- 2× стереокамеры (RGB+инфракрасная подсветка) для работы в полной темноте;
- инерциальный измерительный блок (IMU) – акселерометр, гироскоп, магнитометр;
- датчики давления, температуры, влажности окружающей среды.

• Система безопасности – многоуровневая (аппаратно-программная):

- аварийный останов (E-Stop) с дублированием по радио;
- бамперы и лазерные сканеры безопасности (зонная защита);
- автоматическая диагностика и переход в safe-mode при потере связи.

Все модули имеют единый механический, электрический и информационный интерфейс, что позволяет собрать платформу под конкретную задачу за 15–30 мин без специального инструмента. Габариты базового шасси (без нагрузки) – не более 1200×800×600 мм, масса – 250 кг (в транспортном исполнении – до 450 кг).

Данная конструктивная схема обеспечивает конфигурируемость, ремонтпригодность и масштабируемость, заложенные в концепцию САМП, и служит основой для последующего инженерного проектирования и изготовления опытного образца.

Полученные результаты и их обсуждение

Систематизация ограниченных пространств и формализация требований. В результате анализа производственного цикла ГМК разработана классификация типовых ОП (табл. 1). На её основе методом экспертных оценок и анализа функциональных отказов (FMEA) (от англ. Failure Modes and Effects Analysis) формализована система требований к САМП. Критическим требованиям, таким как точ-

ность навигации ± 10 см для операций точного позиционирования, присвоен наивысший приоритет (RPN > 200) в рамках методологии FMEA.

Таблица 1. Классификация ограниченных пространств горно-металлургического комплекса и целевые показатели для мобильной автономной платформы

Table 1. Classification of confined spaces in the mining and metallurgical industry and target performance indicators for a mobile autonomous platform

Класс пространств	Примеры	Характерные опасности
Подземные выработки	Штреки, забон, шурфы	Обрушение, загазованность, стесненные условия
Технологические аппараты	Печи, бункера, газоходы	Экстремальная температура (>900°C), токсичные газы, зависания материалов
Инфраструктурные объекты	Тоннели, коллекторы, трубопроводы	Затопление, загазованность, протяженность
Зоны геологических нарушений	Заколы, погашенные выработки	Нестабильность массива, высокий риск обрушения

Сравнительный анализ и оценка экономической эффективности. Анализ мирового опыта позволил количественно оценить преимущества автономных систем.

Основное преимущество предлагаемой концепции САМП над существующими системами (включая решения Sandvik, Epiroc и универсальные исследовательские роботы) заключается в комплексном преодолении ключевых научно-технических пробелов, а именно:

1. *Адаптивность к сенсорному вакууму и запылённости.* Разработан гибридный алгоритм SLAM (лидар + стереокамера + IMU + коррекция по магнитным аномалиям), который снижает ошибку позиционирования с 4,2 до 0,8 м на 500 м по сравнению с использованием только лидара. Это обеспечивает точность, необходимую для автономных транспортных и диагностических операций.

2. *Модульность и контекстная автономность.* В отличие от узкоспециализированных роботов, САМП построена на принципе сменных модулей полезной нагрузки (унифицированный интерфейс), что позволяет быстро перенастраивать платформу под разные классы ограниченных пространств (подземные выработки, технологические аппараты, инфраструктура). Иерархическая система целей и схема «Human-on-the-Loop» делегируют тактическое и реактивное управление бортовому искусственному интеллекту, снижая нагрузку на оператора и ускоряя реакцию на нештатные ситуации, при этом сохраняя стратегический контроль человека.

3. *Глубокая киберфизическая интеграция с цифровым двойником предприятия.* САМП выступает

как активный агент, постоянно обновляющий состояние цифрового двойника и получающий от него команды. Это позволяет осуществлять предиктивное управление, динамическое перепланирование и раннее выявление рисков (столкновения, перегрузки) в масштабе всего парка платформ.

4. *Оптимизация энергопотребления и совокупной стоимости владения.* Предложена модель энергозатрат, учитывающая не только движение, но и стоимость деградации аккумулятора и топлива. Для гибридной системы (АКБ + генератор) это позволяет снизить эксплуатационные расходы на 15–20% по сравнению с фиксированными режимами. Комплексная оценка TCO (Total Cost of Ownership) (по формуле (10)) и экономического эффекта показывает окупаемость парка из 5-ти платформ за 2,5–3 года при снижении травматизма на 70–90%, росте производительности на 15–25% и сокращении затрат на ремонт на 25–40%.

Таким образом, главное преимущество – переход от изолированных роботизированных устройств к открытой экосистеме модульных, самоадаптирующихся платформ, глубоко интегрированных в цифровую среду предприятия, что впервые позволяет безопасно и экономически эффективно решать задачи в самых опасных и теснённых условиях ГМК.

Внедрение автономных систем на ряде предприятий привело к: повышению производительности на 22%, снижению расхода топлива на 13%, уменьшению затрат на оплату труда операторов на 30–40%. На основе этих данных и предложенной архитектуры САМП проведена оценка совокупной стоимости владения TCO. Для парка из N модульных платформ TCO за срок службы T лет оценивается как

$$TCO(N, T) = N \cdot \left(C_{\text{capex}} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{opex}}(t) + C_{\text{maint}}(t)}{(1+r)^t} \right) - \sum_{t=1}^T \frac{\Delta B(t)}{(1+r)^t}, \quad (10)$$

где $TCO(N, T)$ – совокупная стоимость владения (Total Cost of Ownership) для N единиц оборудования за период T лет; C_{capex} – капитальные затраты на единицу; C_{opex} – операционные затраты (энергия, связь); C_{maint} – затраты на техническое обслуживание

и ремонт; r – ставка дисконтирования; $\Delta B(t)$ – экономический эффект (выгода, бенефиты) от эксплуатации парка платформ в году (снижение потерь от простоев, экономия на зарплате, снижение штрафов); t – номер года в горизонте планирования; T – расчётный период жизненного цикла.

Формула (10) позволяет оценить чистую приведённую стоимость владения парком из N платформ за срок T , учитывая капитальные вложения, текущие издержки, ремонты и экономический эффект, с учётом временной стоимости денег (дисконтирования по ставке r).

Моделирование для $N=5$, $T=7$ лет показывает, что при достижении планируемых показателей эффективности (снижение простоев на 25%, экономия энергии на 20%) срок окупаемости проекта составляет 2,5–3 года.

Результаты имитационного моделирования навигации. Тестирование гибридного алгоритма SLAM в цифровом двойнике протяжённого тоннеля (длина 500 м) с имитацией периодической запыленности показало следующее:

- при использовании только лидара (Velodyne VLP-16) накопленная ошибка позиционирования к концу тоннеля составила $\varepsilon_{\text{лид}} = 4,2$ м (только лидар);
- при использовании предложенной гибридной схемы (лидар + визуальные метки + IMU с коррекцией по магнитным аномалиям) ошибка не превышала $\varepsilon_{\text{гибрид}} = 0,8$ м.

Данные подтверждают необходимость мультисенсорного подхода для выполнения требования точности ± 1 м для транспортных операций.

Социально-экономический эффект. Потенциальный эффект от масштабного внедрения парка САМП на предприятии ГМК с годовым оборотом от \$1 млрд может включать (табл. 2):

- снижение затрат – прямая экономия на оплате труда и снижение страховых премий за счет устранения персонала из опасных зон;
- рост доходов – увеличение выпуска продукции за счет сокращения внеплановых простоев на 25–35% и оптимизации технологических циклов;
- нематериальные преимущества – повышение капитализации за счет роста ESG-рейтинга (от англ. Environmental, Social, and Governance).

Таблица 2. Оценка потенциального годового эффекта от внедрения парка САМП

Table 2. Assessment of the potential annual effect of implementing a SAMP fleet

Категория эффекта	Методика оценки	Потенциал, %	Примечание
Снижение травматизма	Сравнение LTIFR* до и после	70–90%	*Показатель частоты травм с потерей рабочего времени
Рост производительности	Анализ коэффициента использования оборудования	15–25%	За счет работы 24/7 и оптимизации маршрутов
Экономия энергии	Сравнение удельных расходов	15–20%	Алгоритмическая оптимизация режимов движения
Сокращение затрат на ремонт	Анализ переходов от аварийного к плановому ТО	25–40%	Предиктивная аналитика на основе данных МАП

Заключение

В результате проведенного исследования достигнута поставленная цель: разработаны концептуальные и научно-методические основы, подкрепленные формальными моделями и статистическими оценками, для создания нового класса мобильных автономных платформ для ГМК.

Научная новизна работы заключается:

- в формулировке и количественном обосновании системного противоречия в ГМК на основе анализа производственной статистики;
- в предложении концепции САМП, формализованной через принципы модульности, контекстной автономности и киберфизической интеграции;
- в разработке адаптированных математических моделей навигации (гибридный SLAM) и энергоэффективности для условий сенсорного вакуума и длительной автономности;
- в комплексной оценке совокупной стоимости владения (TCO) и потенциального экономического эффекта, демонстрирующих окупаемость проекта за 2,5–3 года.

Практическая значимость состоит в предоставлении предприятиям ГМК структурированной методологии перехода к роботизации работ в ОП – от первоначальной оценки целевых пространств и задач до выбора архитектуры и оценки экономики проекта. Предложенный модульный подход снижает риски и капитальные затраты на начальном этапе внедрения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной валидацией предложенных моделей на полномасштабных прототипах, разработкой самообучающихся алгоритмов для семантического анализа дефектов, а также созданием отраслевых стандартов на интерфейсы обмена данными между МАП и системами цифровых двойников в рамках концепции Индустрии 4.0.

Список источников

1. Ростехнадзор. Статистические данные о производственном травматизме за 2020-2022 годы. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
2. Правила по охране труда при работе в ограниченных и замкнутых пространствах (утв. приказом Минтруда России от 15 декабря 2020 г. N 902н).
3. Карпушин А.В., Фролов М.С. Экономика цифровой трансформации горного предприятия: оценка потерь от простоев // Горный журнал. 2022. № 5. С. 67–73.
4. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005. 647 p.
5. Pfeiffer M., Haghani T. Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2023, vol. 37, no. 3, pp. 189–215.
6. Khamis A., Jiang J. Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions // Journal of Industrial Information Integration. 2022, vol. 28, p. 100354.

7. Epiroc. Annual and Sustainability Report 2022: Driving Productivity and Sustainability. URL: <https://www.epiroc.com/> (дата обращения: 20.01.2026).
8. Sandvik. AutoMine® Benchmarking Study: Productivity and Cost Analysis. Internal Report Summary, 2021.
9. Головань В.И., Семенов Д.А. Моделирование динамики мобильного робота в средах со сложным рельефом // Инженерный вестник. 2021. № 4. С. 45–52.
10. Brooks R.A. A Robust Layered Control System for A Mobile Robot // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986, vol. RA-2, no. 1, pp. 14–23.
11. Патент RU 2704048 C1. МПК B25J 5/00 (2006.01) Модульная мобильная робототехническая платформа / Савельев А.И., Харьков И.Ю., Павлюк Н.А., Карпов А.А. Патентообладатель ФГБУН СПИИРАН, №2019105802, заявл. 28.02.2019, опубл. 23.10.2019.
12. Smith J., Chen L. Total Cost of Ownership (TCO) Analysis for Industrial Robotics / J. Smith, // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2023, vol. 79, pp. 102443.

References

1. Rostekhnadzor. Statisticheskie dannye o proizvodstvennom travmatizme za 2020-2022 gody [Statistical data on occupational injuries for 2020–2022]. Available at: <https://www.gosnadzor.ru/> (Accessed on October 15, 2023).
2. Occupational safety rules for work in confined and enclosed spaces. Approved by Order No. 902n of the Ministry of Labor of Russia dated December 15, 2020.
3. Karpushin A.V., Frolov M.S. Economics of digital transformation of a mining enterprise: assessment of downtime losses. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2022;(5):67-73. (In Russ.)
4. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005, 647 p.
5. Pfeiffer M., Haghani T. Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2023;37(3):189-215.
6. Khamis A., Jiang J. Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022;28:100354.
7. Epiroc. Annual and Sustainability Report 2022: Driving Productivity and Sustainability. Available at: <https://www.epiroc.com/> (Accessed on January 20, 2026).
8. Sandvik. AutoMine® Benchmarking Study: Productivity and Cost Analysis. Internal Report Summary, 2021.
9. Golovan V.I., Semenov D.A. Modeling the dynamics of a mobile robot in complex terrain environments. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering Vestnik]. 2021;(4):45-52. (In Russ.)
10. Brooks R.A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 1986; RA-2(1):14-23.
11. Saveliev A.I., Kharkov I.Yu., Pavlyuk N.A., Karpov A.A. *Modulnaya mobilnaya robototekhnicheskaya platforma* [Modular mobile robotic platform]. Patent RU, no. 2704048 C1, 2019.
12. Smith J., Chen L. Total Cost of Ownership (TCO) Analysis for Industrial Robotics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2023;79:102443.

Пашко Алексей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике и компьютерных технологий,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: a.pashko@tu-ugmk.com. ORCID 0009-0008-3296-5014

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук,
профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
профессор кафедры автоматике и компьютерных технологий,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: v.s.velikanov@urfu.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Булганина Марина Юрьевна – кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургических и роторных машин,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Alexey D. Pashko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Computer Technology,
Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
Email: a.pashko@tu-ugmk.com. ORCID 0009-0008-3296-5014

Vladimir S. Velikanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;
Professor, Department of Automatics and Computer Technologies,
Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
Email: v.s.velikanov@urfu.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Marina Yu. Bulganina – PhD (Eng.), Docent, Department of Metallurgical and Rotary Machines,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846