Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-32-38

Безлюдная выемка карьерными экскаваторами: алгоритмическое управление и моделирование процесса черпания

А.С. Иванов[1] ✉, О.А. Лукашук[2], Д.С. Стожков[3], А.В. Угольников[3]
[1] ПАО «Сбербанк», г. Москва, Российская Федерация
[2] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация
[3] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ waldteufel@yandex.ru

Резюме: Рассмотрены современные подходы к реализации безлюдной экскаваторной выемки с акцентом на снижение влияния человеческого фактора за счёт перехода к управлению на основе данных и цифровых моделей. Цель исследования – разработка и обоснование методического подхода к алгоритмическому управлению процессом черпания и погрузки. В качестве метода использована формализация управления траекторией движения ковша как многокритериальной задачи оптимизации с ограничениями по нагрузкам, геометрии забоя и условиям безопасности, а также моделирование работы системы на основе данных датчиков и цифровой модели забоя. Показано, что использование замкнутого контура управления с обратной связью по нагрузкам и положению рабочего оборудования позволяет стабилизировать параметры цикла, снизить вариативность режимов работы на 15–25% и ограничить пиковые нагрузки на 10–18%. Дополнительно рассмотрены методы адаптации алгоритмов к изменяющимся условиям забоя, включая учёт кусковатости породы и использование телеметрических данных. Установлено, что внедрение виртуальной зоны загрузки и интеграция с карьерной автоматизированной системой управления обеспечивают повышение безопасности и качества погрузки транспортных средств. Полученные результаты показывают, что переход к алгоритмическому управлению на основе цифровых моделей создаёт предпосылки для внедрения обслуживания по фактическому состоянию и дальнейшей цифровой трансформации горного производства.

Ключевые слова: безлюдная выемка, карьерный экскаватор, алгоритмическое управление, цифровая модель забоя, цифровой двойник, Mining 4.0

Для цитирования: Иванов А.С., Лукашук О.А., Стожков Д.С., Угольников А.В. Безлюдная выемка карьерными экскаваторами: алгоритмическое управление и моделирование процесса черпания. *Горная промышленность.* 2026;(5):32–38. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-32-38

Unmanned excavation using open-pit excavators: algorithmic control and bucket path modelling

A.S. Ivanov[1] ✉, O.A. Lukashuk[2], D.S. Stozhkov[3], A.V. Ugol'nikov[3]
[1] Sberbank PJSC, Moscow, Russian Federation
[2] Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation
[3] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ waldteufel@yandex.ru

Abstract: The paper examines contemporary approaches to unmanned excavation using open-pit excavators, with a focus on reducing the human factor through data-driven and digital-model-based control. The objective is to develop and justify a methodological approach to algorithmic control of the digging and loading cycle. The method involves formalizing bucket path control as a multi-criteria optimization problem subject to constraints on the drive loads, face geometry, and safety requirements, combined with the system simulation based on the sensor data and a digital face model. It is shown that a closed-loop control system with feedback on loads and position of the working equipment stabilizes the cycle parameters, reduces the operating variability by 15–25%, and limits the peak loads by 10–18%. Methods are additionally considered for adapting the algorithms to changing face conditions, including the rock fragmentation analysis and telemetry data. It is established that introduction of a virtual loading zone and integration with the in-pit fleet management system improve safety and quality of loading. The results demonstrate that transition to the algorithmic control based on digital models creates prerequisites for condition-monitored maintenance and further digital transformation of mining operations.

Keywords: unmanned excavation, open-pit excavator, algorithmic control, digital face model, digital twin, Mining 4.0
For citation: Ivanov A.S., Lukashuk O.A., Stozhkov D.S., Ugol'nikov A.V. Unmanned excavation using open-pit excavators: algorithmic control and bucket path modelling. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):32–38. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-32-38

Введение

Открытая разработка полезных ископаемых в последние десятилетия характеризуется устойчивым трендом к цифровизации и автоматизации технологических процессов [1–3]. Ключевое направление развития – переход к безлюдной экскаваторной выемке, при которой управление карьерными экскаваторами передаётся алгоритмическим системам, работающим на основе данных датчиков и цифровых моделей [4; 5].

Традиционная схема эксплуатации карьерных экскаваторов типа ЭКГ основана на управлении машинистом, находящимся в кабине [6; 7]. Параметры цикла черпания и погрузки – глубина внедрения ковша, траектория движения, скорость рабочих органов, режимы загрузки – определяются на основе визуального контроля и субъективного опыта. Такой подход приводит к высокой вариативности рабочих циклов, обусловленной квалификацией и физическим состоянием оператора, запылённостью и условиями освещённости [8–11]. В результате возрастает вероятность перегрузок, динамических ударов и неравномерного распределения нагрузок, что ускоряет износ оборудования и повышает риск отказов.

Концепция Mining 4.0 предполагает интеграцию датчиков, систем мониторинга, аналитических платформ и цифровых двойников в единый контур управления технологическими процессами [1; 2; 12; 13]. Карьерный экскаватор в этой парадигме рассматривается не как изолированная машина, а как элемент распределённой интеллектуальной системы [14; 15]. Ключевой элемент таких систем – цифровая модель забоя, формируемая на основе данных лидаров, 3D-камер, инерциальных и позиционных датчиков [5; 16]. Её использование позволяет перейти от визуального управления к алгоритмическому, при котором параметры цикла черпания определяются на основе формализованных критериев [4; 17].

Несмотря на значительный прогресс в области автоматизации, ряд вопросов остаётся недостаточно исследованным: задачи формализации траектории черпания с учётом кусковатости породы, интеграция алгоритмов управления с системами обслуживания по фактическому состоянию, сопряжение с автоматизированной системой управления горнотранспортным комплексом (АСУ ГТК) [12; 13; 16]. Цель исследования – разработка и обоснование методического подхода к алгоритмическому управлению процессом черпания и погрузки карьерных экскаваторов на основе цифровых моделей.

Материалы и методы

Термин «безлюдная экскаваторная выемка» обозначает режим функционирования карьерных экскаваторов, при котором непосредственное управление циклом черпания и погрузки осуществляется не машинистом, а алгоритмическими системами, работающими на основе данных датчиков и цифровой модели забоя. Принципиальное отличие – перенос ответственности за принятие решений с субъективного опыта оператора на формализованные алгоритмы, обеспечивающие воспроизводимость и стабильность технологических режимов [4; 5].

Для описания таких систем используется представление о нескольких уровнях автоматизации (рис. 1). На нижнем уровне находится традиционный операторо-ориентированный режим [6; 7]. Следующий этап – дистанционное управление, при котором оператор физически удалён от машины, но логика принятия решений сохраняется. Существенное снижение влияния человеческого фактора достигается на уровне полуавтоматического управления, где формирование траектории движения ковша выполняется алгоритмически [4; 5]. Наиболее высокий уровень – частично или полностью автономный режим, при котором человек выполняет функции контроля и реагирования на нештатные ситуации [1; 2].

Методологическая основа исследования – использование многоканальной информации от системы датчиков, установленных на экскаваторе и в его рабочей зоне [12; 13; 15]:

– пространственная информация о поверхности забоя (лидары, 3D-камеры);

– параметры положения и ориентации рабочего оборудования (инерциальные датчики, энкодеры);

– данные о нагрузках приводов (токовые датчики, тензодатчики);

– данные систем позиционирования (GNSS, RTK).

На основе совокупности этих данных формируется цифровая модель забоя – геометрически и физически согласованное описание текущего состояния процесса выемки [13; 16].

Процесс черпания рассматривается как задача формирования рациональной траектории движения ковша в условиях ограничений по нагрузкам, геометрии забоя и требованиям безопасности. Траектория ковша определяется как управляемая функция времени, обеспечивающая минимизацию совокупного критерия эффективности:

$$J = \alpha \cdot E + \beta \cdot \sigma_L + \gamma \cdot T,$$

где E – энергозатраты за цикл (интегральная оценка мощности приводов); σ_L – показатель вариативности нагрузок (среднеквадратичное отклонение усилий в приводах); T – длительность цикла черпания; α, β, γ – весовые коэффициенты, нормируемые при оптимизации.

На траекторию накладывается система ограничений: по максимальным усилиям приводов напора, подъёма и поворота; по геометрии забоя; по безопасности (предотвращение столкновений с транспортными средствами) [9; 18].

Практическая реализация осуществляется в дискретном виде: траектория ковша представляется последовательностью состояний, управление реализуется в виде замкнутого контура с обратной связью (рис. 2). На каждом шаге производится оценка текущего состояния системы по данным датчиков и корректировка управляющих воздействий [4; 5].

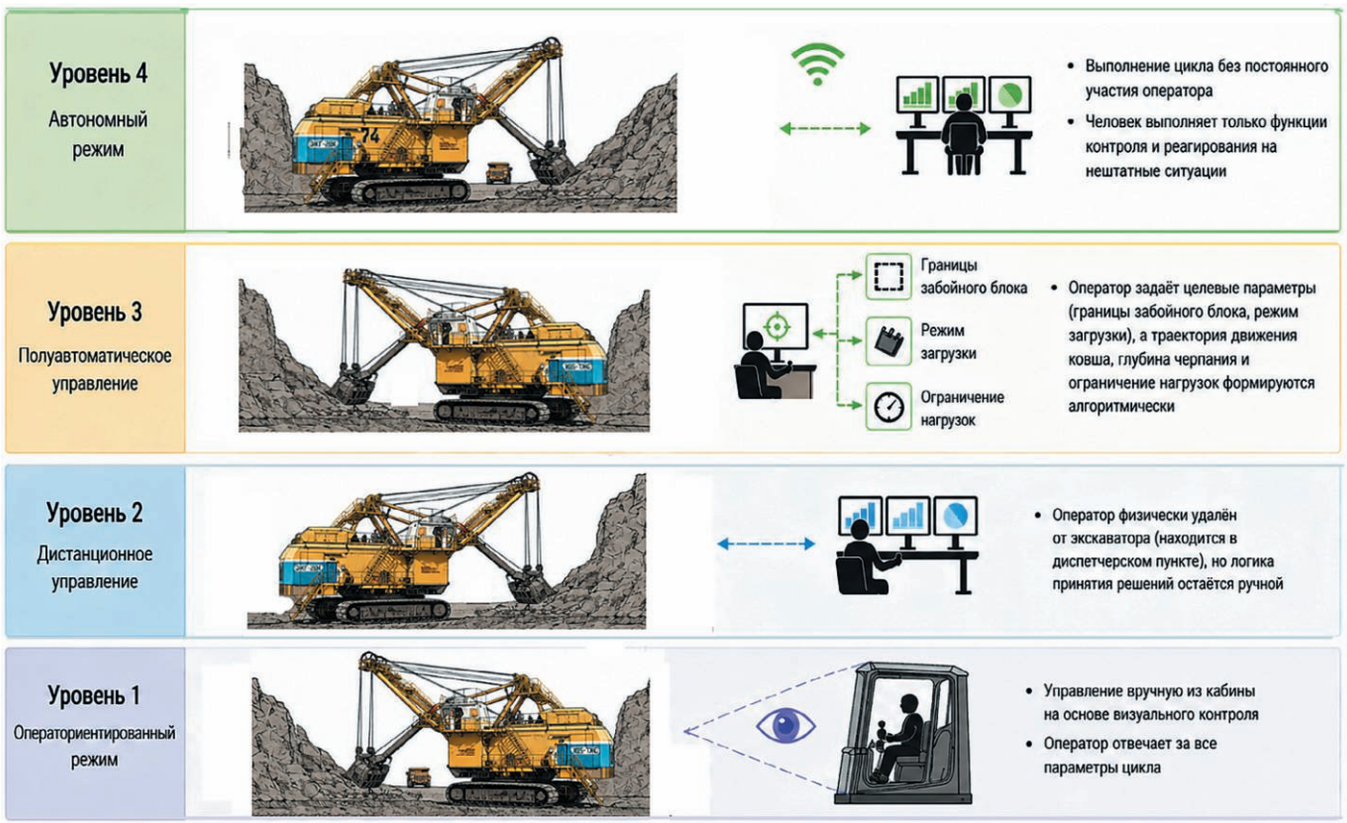


Рис. 1
Уровни автоматизации экскаваторной выемки

Fig. 1
Automation levels of excavator digging

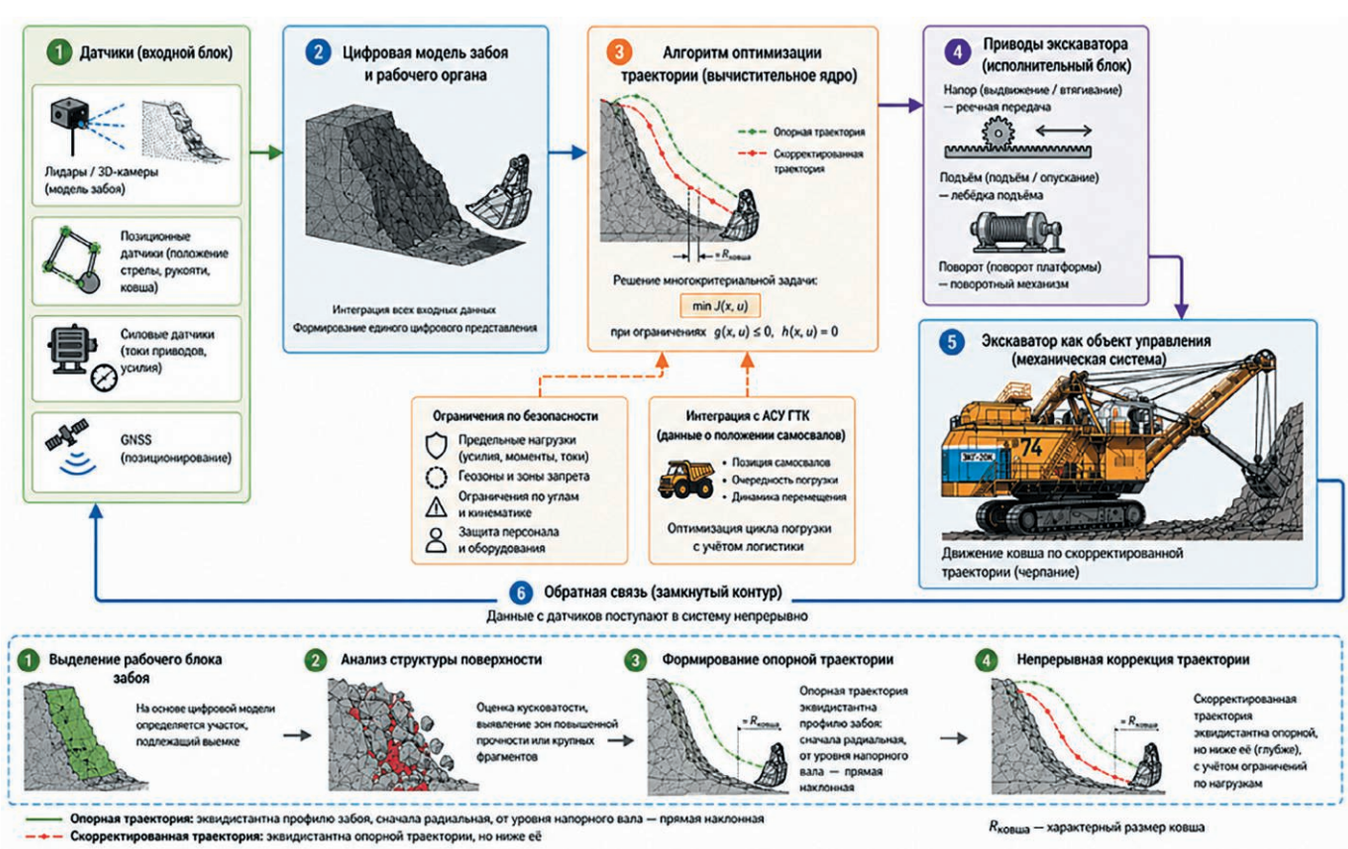


Рис. 2
Архитектура замкнутого контура управления процессом черпания

Fig. 2
Closed-loop control architecture for the digging process

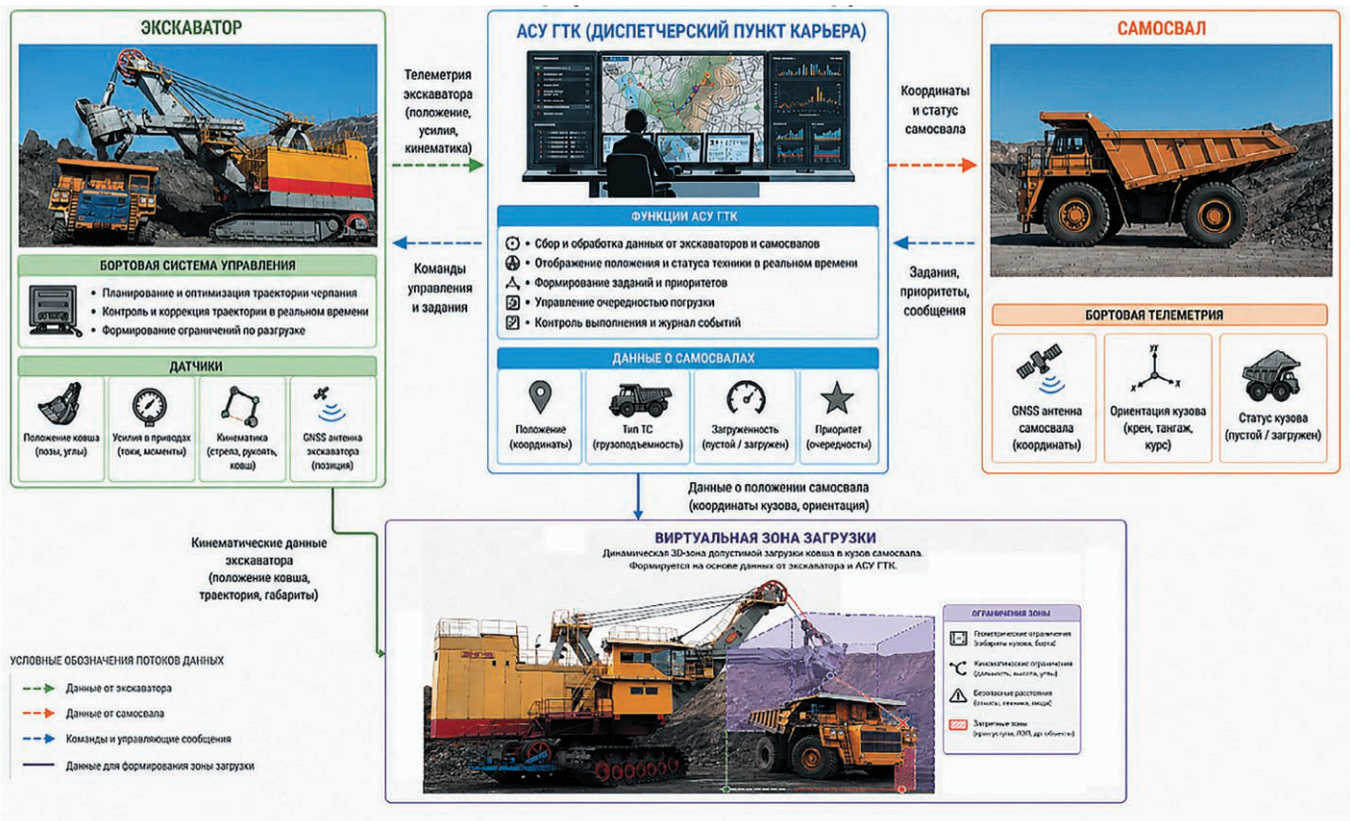


Рис. 3
Схема взаимодействия экскаватора с АСУ ГТК и виртуальной зоной загрузки

Fig. 3
A flowchart showing interaction of an excavator with the fleet management system and virtual loading zone

Алгоритм включает четыре взаимосвязанных этапа:

1. Выделение рабочего блока забоя – на основе цифровой модели определяется участок, подлежащий выемке.

2. Анализ структуры поверхности – оценивается кусковатость, выявляются зоны повышенной прочности или негабарит.

3. Формирование опорной траектории – обеспечивает заданную толщину стружки и допустимый уровень нагрузок.

4. Непрерывная коррекция траектории – при приближении нагрузок к предельным значениям уменьшается глубина внедрения, корректируется скорость или направление движения [8; 9].

Существенный элемент методики – адаптация алгоритмов к изменяющимся условиям забоя на основе телеметрических данных предыдущих циклов [12; 13]. Анализ накопленной информации позволяет уточнять параметры модели (зависимость сопротивления копанию от характеристик породы) и корректировать управляющие параметры при повторной разработке аналогичных участков [15; 16]. В результате формируется адаптивная система, способная подстраиваться под реальные условия эксплуатации без непосредственного участия оператора.

Для этапа погрузки используется метод формирования виртуальной зоны загрузки – допустимого трёхмерного пространства разгрузки ковша в кузов самосвала [4; 14]. Параметры зоны определяются с учётом геометрии ковша, положения транспортного средства (данные GNSS и бортовых датчиков самосвала) и кинематических возможностей экскаватора. При выходе за допустимые границы система переводит процесс в безопасный режим. Схема взаимодействия показана на рис. 3. Интеграция с АСУ ГТК позволяет учитывать динамику движения самосвалов, формировать оптимальные режимы загрузки и координировать работу экскаватора с другими элементами технологической цепи [8].

В качестве основных показателей оценки эффективности рассматриваются: вариативность нагрузок; уровень пиковых усилий; длительность цикла; устойчивость технологических режимов. Дополнительно применяются методы предиктивной аналитики для оценки технического состояния узлов и прогнозирования вероятности отказов [10; 11].

Результаты

Реализация предложенного подхода позволяет перейти от вариативных операторо-ориентированных режимов к воспроизводимым и стабилизированным технологическим циклам. Анализ, основанный на имитационном моделировании (500 циклов черпания с варьированием параметров забоя) и обработке телеметрических данных, позволяет выявить следующие эффекты.

1. **Снижение вариативности рабочих циклов**. В условиях традиционного управления параметры черпания существенно варьируются в зависимости от действий машиниста [6; 7]. В алгоритмическом режиме эти параметры стабилизируются на основе заданных ограничений и целевой функции. По результатам моделирования разброс значений длительности цикла и нагрузок снижается на 15–25%, что обеспечивает более равномерную работу оборудования [4; 5].

2. **Ограничение пиковых нагрузок.** Алгоритм непрерывно контролирует токи приводов, усилия и ускорения рабочего оборудования; при приближении к предельным значениям корректирует траекторию. Это позволяет снизить максимальные значения нагрузок на 10–18% по сравнению

с ручным управлением [9; 18]. Снижение пиковых нагрузок непосредственно влияет на ресурс узлов и агрегатов, уменьшая интенсивность изнашивания.

3. **Адаптация к кусковатости и неоднородности забоя**. Использование сегментации цифровой модели забоя и учёт кусковатости породы повышают устойчивость процесса черпания. Алгоритм обеспечивает обход участков с повышенной прочностью или изменение параметров внедрения, снижая вероятность скачков нагрузки. В отличие от субъективной визуальной оценки, формализованный анализ поверхности обеспечивает предсказуемое поведение процесса [19].

4. **Повышение качества погрузки транспортных средств**. Внедрение виртуальной зоны загрузки существенно сокращает вероятность входа ковша в опасную зону и минимизирует риск столкновения с кузовом самосвала. Алгоритмическая коррекция траектории разгрузки обеспечивает более равномерное распределение массы в кузове, снижая вероятность перекосов и локальных перегрузок.

5. **Создание предпосылок для обслуживания по фактическому состоянию**. Регистрация параметров каждого цикла позволяет формировать подробные профили эксплуатации оборудования. На основе этих данных возможно прогнозирование деградационных процессов и переход от регламентного технического обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию [12; 13].

6. **Интеграция в архитектуру карьера**. Предложенный подход демонстрирует наибольшую эффективность при интеграции в общую архитектуру АСУ ГТК [20–22]. В этом случае экскаватор функционирует как элемент единой цифровой системы, а управление процессом выемки становится частью глобальной оптимизации технологической цепочки [15; 16].

Обсуждение

Снижение вариативности и пиковых нагрузок имеет принципиальное значение для практики эксплуатации тяжёлых карьерных машин. В ручном режиме даже опытный машинист не всегда способен поддерживать оптимальный режим длительное время, особенно при изменении характеристик забоя [6; 7]. Алгоритмическое управление с непрерывным контролем и коррекцией траектории устраняет этот фактор [4; 5].

Особое значение имеет интеграция управления траекторией черпания с анализом кусковатости и структуры забоя. Использование цифровой модели и алгоритмов сегментации позволяет формализовать оценку свойств породы, обеспечивая более точный выбор параметров внедрения ковша. Предложенный подход ориентирован на алгоритмизацию цикла для тяжёлых карьерных машин, что соответствует тенденциям Mining 4.0 [1–3].

Существенный аспект – влияние алгоритмического управления на техническое обслуживание и ремонт. Стабилизация режимов и снижение пиковых нагрузок уменьшают интенсивность деградационных процессов, а использование предиктивной аналитики позволяет перейти к обслуживанию по фактическому состоянию [11–13].

Практическая реализация сопряжена с рядом ограничений. Технические: требования к точности датчиков; устойчивость каналов связи; вычислительные ресурсы бортовых систем [15; 17]. Организационные: изменение роли машиниста; необходимость дополнительного обучения персонала; адаптация производственных регламентов [6; 7]. Дальнейшее развитие направления связано с совершенствованием адаптивных алгоритмов и расширением применения цифровых двойников [12; 13; 16].

Заключение

Проведённое исследование показывает, что безлюдная экскаваторная выемка карьерными экскаваторами представляет собой реализуемое технологическое направление, ключевым условием которого является переход от операторо-ориентированного управления к алгоритмическому, основанному на данных датчиков и цифровых моделях забоя. Формализация задачи управления траекторией ковша в виде многокритериальной оптимизации с замкнутым контуром обратной связи по нагрузкам обеспечивает стабилизацию технологических режимов: по результатам имитационного моделирования вариативность параметров цикла снижается на 15–25%, а пиковые нагрузки на приводы ограничиваются на 10–18%, что непосредственно уменьшает интенсивность изнашивания и повышает ресурс основных узлов экскаватора.

Существенным элементом предложенной методики является использование цифровой модели забоя и алгоритмов сегментации для формализованного учёта кусковатости и неоднородности породы. В отличие от субъективной визуальной оценки машиниста, этот подход обеспечивает предсказуемое взаимодействие ковша с горным массивом и предотвращает возникновение критических нагрузок, характерных для операторского режима. Внедрение виртуальной зоны загрузки в сочетании с интеграцией в АСУ ГТК повышает безопасность погрузочных операций и согласует работу экскаватора с динамикой транспортного комплекса, превращая машину из изолированной единицы в элемент единой цифровой системы управления карьером.

Дополнительный эффект алгоритмического управления состоит в накоплении детализированных профилей эксплуатации оборудования, что создаёт технологическую основу для перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. Вместе с тем практическое внедрение безлюдной выемки определяется не только совершенством алгоритмов, но и надёжностью датчиковой инфраструктуры, устойчивостью каналов передачи данных и организационной готовностью предприятий к трансформации функций машиниста. В целом безлюдная экскаваторная выемка должна рассматриваться как органичный элемент комплексной цифровой трансформации горного производства, дальнейшее развитие которого связано с совершенствованием адаптивных и самообучающихся алгоритмов управления, расширением применения цифровых двойников и углублением интеграции технологических процессов на уровне всего горнотранспортного комплекса.

Список литературы / References

1. Bi L., Wang Z., Wu Z., Zhang Y. A new reform of mining production and management modes under Industry 4.0: Cloud mining mode. *Applied Sciences.* 2022;12(6):2781. https://doi.org/10.3390/app12062781

2. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Korotkova A.N., Dyorina K.S. The challenges of Industry 4.0 and the need for new answers in the mining industry. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*. 2021;(2):154–166. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-154-166

3. Балашов А.М. Перспективы использования цифровых решений и возможностей «Индустрии 4.0» в производственных процессах предприятий горной промышленности. *Теоретическая экономика*. 2024;(2):46–53. Режим доступа: https://chemintech.ru/ru/nauka/article/80996/view (дата обращения: 19.03.2026).
Balashov A.M. Prospects for the use of digital solutions and the capabilities of industry 4.0 in the production processes of mining enterprises. *Theoretical Economics*. 2024;(2):46–53. (In Russ.) Available at: https://chemintech.ru/ru/nauka/article/80996/view (accessed: 19.03.2026).

4. Chen L., Xie Y., He Y., Ai Y., Tian B., Li L. et al. Autonomous mining through cooperative driving and operations enabled by parallel intelligence. *Communications Engineering*. 2024;3:75. https://doi.org/10.1038/s44172-024-00220-5

5. Fu T., Zhang T., Lv Y., Song X., Li G., Yue H. Digital twin-based excavation trajectory generation of Uncrewed excavators for autonomous mining. *Automation in Construction*. 2023;151:104855. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104855

6. Великанов В.С., Олизаренко В.В. К вопросу ранжирования профессиональных навыков машиниста карьерных экскаваторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(3):315–319. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Velikanov_3_2010.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Velikanov V.S., Olizarenko V.V. The ranging of professional skills of shovel runner. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(3):315–319. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Velikanov_3_2010.pdf (accessed: 19.03.2026).

7. Великанов В.С. Тестовые методики и тренажерные средства в системе повышения профессионального мастерства операторов горных машин. *Горный журнал*. 2012;(9):131–133. Режим доступа: https://www.rudmet.ru/journal/949/article/14870/ (дата обращения: 19.03.2026).
Velikanov V.S. Test methodologies and training facilities in the system of professional skill increasing of mining machines' operators. *Gornyi Zhurnal*. 2012;(9):131–133. (In Russ.) Available at: https://www.rudmet.ru/journal/949/article/14870/ (accessed: 19.03.2026).

8. Шишлянников Д.И., Иванов С.Л., Звонарев И.Е., Зверев В.Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):116–124. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124
Shishlyannikov D.I., Ivanov S.L., Zvonarev I.E., Zverev V.Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):116–124. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124

9. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Шишкин П.В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2). *Горная промышленность*. 2024;(4):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114
Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Shishkin P.V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114

10. Хамидов О.У., Шибанов Д.А., Шишкин П.В., Колпаков В.О. Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана. *Горная промышленность*. 2024;(5):135–142. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-135-142
Khamidov O.U., Shibanov D.A., Shishkin P.V., Kolpakov V.O. Efficiency of excavators application in open pit mines of Uzbekistan. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):135–142. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-135-142

11. Ivanov S.L., Shishkin P.V. Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87:022009. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022009

12. Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R.S. Exploring digital twin systems in mining operations: A review. Green and Smart *Mining Engineering*. 2024;1(4):474–492. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.09.003

13. Miao B., Ge S., Guo Y., Zhou J., Jiang E. Construction of digital twin system for intelligent mining in coal mines. *Journal of Mining Science and Technology*. 2022;7(2):143–153. (In Chinese) https://doi.org/10.19606/j.cnki.jmst.2022.02.001

14. Великанов В.С., Гришин И.А., Акманова З.С., Лукашук О.А., Лукашук А.Д. Современные аспекты создания горнотранспортных машин в условиях цифровой трансформации горных предприятий. *Горная промышленность*. 2024;(5S):28–32. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32
Velikanov V.S., Grishin I.A., Akmanova Z.S., Lukashuk O.A., Lukashuk A.D. Contemporary aspects of designing mining transport machines in the context of digital transformation of mining operations. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):28–32. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32

15. Иванов А.С., Макарова В.В. IT-технологии в проектировании, эксплуатации и ремонте горных машин. *Горная промышленность*. 2026;(2):114–119. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-114-119
Ivanov A.S., Makarova V.V. IT-technologies in design, operation and maintenance of mining machines. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):114–119. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-114-119

16. Hazrathosseini A., Afrapoli A.M. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived. *Resources Policy*. 2023;80:103155. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103155

17. Абу-Абед Ф.Н., Наумова Л.Г. IT-технологии в автоматизации технологических процессов в горной промышленности. *Техника и технология горного дела*. 2019;(3):21–35. https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-21-35
Abu-Abed F.N., Naumova L.G. IT-technologies in technological process automation in mining. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019;(3):21–35. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-21-35

18. Плащинский В.А., Шешукова Е.И., Салимов А.Э., Шибанов Д.А., Иванов С.Л. Численное моделирование процесса копания ковшом экскаватора методом дискретных элементов. *Горная промышленность*. 2025;(4):144–150. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-144-150
Plaschinsky V.A., Sheshukova E.I., Salimov A.E., Shibanov D.A., Ivanov S.L. Numerical simulation of the digging process with an excavator bucket using the discrete element method. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):144–150. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-144-150

19. Дремин А.В., Ситдикова С.В., Великанов В.С., Стожков Д.С., Гришин И.А. Анализ кусковатости горных пород в реальном времени с использованием отечественного программно-аппаратного обеспечения. *Горная промышленность*. 2025;(3):118–123. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123

Dremin A.V., Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stozhkov D.S., Grishin I.A. Real-time analysis of particle size distribution of rocks using a domestic software and hardware complex. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):118–123. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123

20. Лях Д.Д., Худякова И.Н., Иванов С.Л. Обоснование параметров модуля формования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования по добыче и переработке торфа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6):93–108. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_93
Lyakh D.D., Khudyakova I.N., Ivanov S.L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6):93–108. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_93

21. Zvonarev I.E., Ivanov S.L. Evaluation of losses in transmission of machinery for development of mineral deposits in conditions of variable load. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87:022024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022024

22. Мякотных А.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. К вопросу классификации комплексов добычи торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2023;(6):137–142. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-137-142
Myakotnykh A.A., Ivanova P.V., Ivanov S.L. On classification of peat extraction complexes. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):137–142. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-137-142

Информация об авторах
Иванов Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, руководитель направления, ПАО «Сбербанк», г. Москва, Российская Федерация; waldteufel@yandex.ru
Лукашук Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой подъёмно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4952-0344; e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru
Стожков Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0003-8962-9357; e-mail: Stogkov@mail.ru
Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-8442-4841; e-mail: ugolnikov@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 08.05.2026
Поступила после рецензирования: 24.06.2026
Принята к публикации: 29.06.2026

Information about the authors
Aleksey S. Ivanov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Sberbank PJSC, Moscow, Russian Federation; waldteufel@yandex.ru
Olga A. Lukashuk – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4952-0344; e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru
Dmitriy S. Stozhkov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0003-8962-9357; e-mail: Stogkov@mail.ru
Aleksandr V. Ugol'nikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-8442-4841; e-mail: ugolnikov@yandex.ru

Article info
Received: 08.05.2026
Revised: 24.06.2026
Accepted: 29.06.2026