ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.658
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-65-73

REVIEW ARTICLE
UDC 622.658

Современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства

В. А. Атрушкевич✉, С. М. Попов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» РАН, г. Москва, Российская Федерация
✉ *iugi@mail.ru*

Резюме. Рассматриваются современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта (ИИ) в обеспечении безопасности горного производства. Актуальность исследования обусловлена высоким уровнем производственных рисков в горнодобывающей отрасли и необходимостью повышения эффективности систем промышленной безопасности в условиях цифровой трансформации. Проведен анализ теоретических основ развития ИИ, особенностей обеспечения безопасности горного производства, а также роли интеллектуальных технологий в управлении производственными рисками. Рассмотрены современные практики внедрения ИИ на российских и зарубежных горнодобывающих предприятиях, включая предиктивную аналитику, компьютерное зрение, цифровые двойники и системы поддержки принятия решений. Выявлены основные проблемы и ограничения применения ИИ, такие как недостаточная цифровая инфраструктура, дефицит кадров, высокая стоимость внедрения и вопросы нормативно-правового регулирования. Обоснованы перспективные направления развития ИИ в горной промышленности, включая создание автономных систем, развитие цифровых экосистем и совершенствование организационного механизма внедрения. Разработаны рекомендации по повышению эффективности применения ИИ в системе промышленной безопасности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, горная промышленность, промышленная безопасность, цифровизация, предиктивная аналитика, компьютерное зрение, цифровой двойник, управление рисками, автоматизация производства, интеллектуальные системы

Для цитирования: Атрушкевич В.А., Попов С.М. Современное состояние и перспективы организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства**.** *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 65-73. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-65-73.

The current state and prospects of organizing the use of artificial intelligencein mining safety issues

V. A. Atrushkevich✉, S. M. Popov
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ *iugi@mail.ru*

Abstract. The article examines the current state and prospects for organizing the use of artificial intelligence (AI) in ensuring the safety of mining operations. The relevance of the study is due to the high level of production risks in the mining industry and the need to improve the efficiency of industrial safety systems in the context of digital transformation. An analysis has been carried out of the theoretical foundations of AI development, the specifics of ensuring the safety of mining operations, and the role of intelligent technologies in managing production risks. Modern practices of AI implementation at Russian and foreign mining enterprises are considered, including predictive analytics, computer vision, digital twins, and decision support systems. The main problems and limitations of AI application have been identified, such as insufficient digital infrastructure, a shortage of personnel, the high cost of implementation, and issues related to regulatory and legal regulation. Promising directions for the development of AI in the mining industry have been substantiated, including the creation of autonomous systems, the development of digital ecosystems, and the improvement of the organizational mechanism for implementation. Recommendations have been developed to enhance the effectiveness of AI application in the industrial safety system.

© Атрушкевич В. А., Попов С. М., 2026

Keywords: artificial intelligence; mining industry; industrial safety; digitalization; predictive analytics; computer vision; digital twin; risk management; production automation; intelligent systems

For citation: Atrushkevich V.A., Popov S.M. The current state and prospects of organizing the use of artificial intelligence in mining safety issues. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (5): 65-73. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-65-73.

Введение

Современное развитие горнодобывающей промышленности характеризуется усложнением технологических процессов, ростом глубины и масштабов добычи полезных ископаемых, а также повышением требований к промышленной и экологической безопасности [1]. Горное производство относится к числу наиболее опасных отраслей экономики, что обусловлено воздействием неблагоприятных геологических условий, использованием сложной техники, наличием взрывоопасных и токсичных газов, а также высоким уровнем производственного травматизма [2, 3]. В этих условиях обеспечение безопасности становится приоритетной задачей, требующей применения современных цифровых технологий [4, 5].

Одним из наиболее перспективных направлений повышения уровня промышленной безопасности является внедрение искусственного интеллекта (ИИ) [6, 7]. Развитие ИИ-технологий позволяет существенно расширить возможности анализа производственных данных, прогнозирования аварийных ситуаций, автоматизации контроля технологических процессов и снижения влияния человеческого фактора [8–10]. Искусственный интеллект становится важным инструментом перехода от реактивной модели обеспечения безопасности к предиктивной и проактивной системе управления рисками [11–13].

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности систем промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях в условиях цифровой трансформации экономики [4, 14, 15]. Несмотря на активное внедрение отдельных элементов ИИ, уровень их интеграции в систему управления безопасностью остается недостаточным, что требует комплексного анализа современного состояния и перспектив развития данных технологий [6, 7, 16].

Объектом исследования выступает система обеспечения безопасности горного производства. Предметом исследования является организация применения искусственного интеллекта в данной системе.

Цель работы: изучение современного состояния внедрения ИИ в горной промышленности и определение перспектив его дальнейшего развития в области промышленной безопасности [2, 4, 5].

Задачи исследований: рассмотреть сущность и основные направления развития искусственного интеллекта; проанализировать особенности обеспечения безопасности горного производства; изучить современные практики применения ИИ на предприятиях; выявить проблемы и ограничения внедрения интеллектуальных технологий; определить перспективы их развития и разработать рекомендации по повышению эффективности использования ИИ [6, 9].

Методологическую основу исследования составляют системный подход, анализ и синтез информации, сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта, а также обобщение научных публикаций и практических данных [5, 8, 17].

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для совершенствования систем промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях и повышения эффективности применения технологий искусственного интеллекта [3, 4, 12].

Таким образом, исследование современного состояния и перспектив организации применения искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства является актуальным и имеет важное теоретическое и практическое значение в условиях цифровой трансформации промышленности [7, 13, 14].

Результаты исследований

Искусственный интеллект в системе управления промышленной безопасностью горных предприятий

Искусственный интеллект занимает важное место в современной системе управления промышленной безопасностью горных предприятий, поскольку позволяет существенно повысить уровень контроля, прогнозирования и предупреждения производственных рисков [4, 6, 7]. Горнодобывающая отрасль относится к числу наиболее опасных сфер промышленности, где высока вероятность аварий, обрушений, выбросов газа, отказов оборудования и производственного травматизма [2]. В этих условиях традиционные методы управления безопасностью уже не всегда обеспечивают необходимую эффективность, что делает внедрение интеллектуальных технологий особенно актуальным [5, 14].

Основная роль ИИ заключается в переходе от реактивной модели безопасности, при которой меры принимаются после возникновения инцидента, к предиктивной системе управления рисками, ориентированной на предупреждение аварийных ситуаций [9, 10, 13]. Искусственный интеллект анализирует большие объемы производственных данных, выявляет скрытые закономерности и позволяет прогнозировать потенциальные угрозы еще до их фактического проявления [6, 9].

Одним из ключевых направлений применения ИИ является непрерывный мониторинг опасных производственных факторов. Системы интеллектуального контроля позволяют отслеживать концентрацию метана, угольной пыли, температуру, давление, вибрации, устойчивость горных пород и состояние оборудования [5, 9]. В отличие от традиционного мониторинга ИИ способен не только фиксировать отклонения, но и оценивать вероятность развития аварийной ситуации на основе комплексного анализа параметров [10].

Важное место ИИ занимает в системе предиктивного обслуживания оборудования. На горных предприятиях поломки техники могут приводить к тяжелым последствиям, включая остановку производства и аварии [3, 9]. ИИ анализирует данные о работе оборудования, выявляет признаки износа и прогнозирует возможные отказы, что позволяет

своевременно проводить ремонт и снижать вероятность чрезвычайных ситуаций [6, 9, 16].

Значительную роль играют технологии компьютерного зрения, используемые для контроля соблюдения требований охраны труда и промышленной безопасности [7, 11]. С помощью камер видеонаблюдения и алгоритмов распознавания ИИ фиксирует нахождение работников в опасных зонах, использование средств индивидуальной защиты, соблюдение технологических регламентов и безопасное перемещение техники [11, 12]. Это позволяет оперативно предотвращать нарушения и снижать уровень производственного травматизма.

ИИ также активно используется в системах поддержки принятия решений (СППР) для диспетчеров, инженеров и руководителей [12]. Такие системы анализируют оперативную информацию, предлагают рекомендации по устранению рисков, помогают оценивать последствия возможных решений и повышают качество управленческих действий в условиях повышенной ответственности [2, 6].

Особое значение имеет использование ИИ в рамках цифровых двойников предприятий, которые позволяют моделировать аварийные сценарии, анализировать устойчивость горных выработок и тестировать управленческие решения без риска для реального производства [14, 17]. Это усиливает стратегическую составляющую промышленной безопасности и способствует более точному управлению производственными процессами [4, 14].

ИИ также становится важным элементом единой цифровой экосистемы предприятия, объединяя системы мониторинга, SCADA, ERP, датчики, аналитические платформы и управленческие решения в информационную среду [4, 10, 15]. Такая интеграция обеспечивает централизованное управление безопасностью, повышает прозрачность процессов и ускоряет реагирование на угрозы [7, 14].

Однако эффективное место ИИ в системе промышленной безопасности возможно только при наличии соответствующей цифровой инфраструктуры, подготовленных кадров, нормативного регулирования и организационного сопровождения [4, 14]. Без системного подхода даже современные технологии не смогут обеспечить устойчивый результат [7, 10].

Таким образом, искусственный интеллект становится не просто вспомогательным инструментом, а важнейшим элементом системы управления промышленной безопасностью горных предприятий [6, 7]. Его использование позволяет значительно снизить аварийность, минимизировать влияние человеческого фактора, повысить надежность производственных процессов и обеспечить переход к интеллектуальной модели безопасного горного производства [8, 9, 13].

Анализ существующих практик использования искусственного интеллекта на горнодобывающих предприятиях

В современных условиях цифровой трансформации промышленности искусственный интеллект становится важным инструментом повышения эффективности и безопасности горнодобывающих предприятий [4, 6, 7]. Горная промышленность характеризуется высоким уровнем производственных рисков, сложностью технологических процессов и необходимостью постоянного контроля состояния оборудования, производственной среды и персонала [2, 5]. В связи с этим применение ИИ направлено прежде всего на предупреждение аварий, снижение производственного травматизма и повышение надежности производственных систем [8, 9].

Одной из наиболее распространенных практик является использование предиктивной аналитики для прогнозирования отказов оборудования [9, 10]. На крупных предприятиях внедряются системы, анализирующие данные с датчиков температуры, вибрации, давления и нагрузки на оборудование [3, 9]. Искусственный интеллект выявляет скрытые закономерности, предшествующие поломкам, и позволяет планировать техническое обслуживание до возникновения аварийной ситуации [6, 9, 16]. Такой подход значительно снижает количество внеплановых простоев и повышает безопасность эксплуатации техники [9, 16].

Широкое распространение получили системы компьютерного зрения, применяемые для контроля опасных зон и соблюдения требований охраны труда [12, 18]. С помощью видеокамер и алгоритмов ИИ осуществляется автоматическое распознавание присутствия работников в запрещенных зонах, использования средств индивидуальной защиты, соблюдения технологических регламентов и контроля передвижения техники [15, 16]. Это позволяет оперативно выявлять нарушения и предотвращать несчастные случаи [2].

Особое значение имеют системы интеллектуального мониторинга газовой среды и аэрологической безопасности, особенно на угольных шахтах [11]. ИИ используется для анализа концентрации метана, угольной пыли, температуры, влажности и вентиляционных параметров [5, 8]. На основе непрерывного мониторинга система способна прогнозировать опасные состояния шахтной атмосферы, предупреждать о риске взрывов, пожаров и профессиональных заболеваний работников [7, 9].

Практика показывает высокую эффективность применения ИИ в области автоматизированных медицинских осмотров персонала [16]. На ряде предприятий используются системы предсменного контроля состояния работников, которые автоматически измеряют давление, частоту пульса, выявляют признаки усталости, стресса или алкогольного опьянения [3, 16]. Это снижает риск допуска сотрудников к работе в состоянии, представляющем угрозу для безопасности производства [3].

Важным направлением является использование цифровых двойников и интеллектуального моделирования производственных процессов [14, 17]. Виртуальные модели шахт, карьеров и оборудования позволяют прогнозировать развитие аварийных ситуаций, анализировать устойчивость горных пород, тестировать сценарии аварий без риска для реального производства [14, 17, 19]. Это значительно повышает качество управленческих решений [4, 14].

На многих предприятиях внедряются системы поддержки принятия решений (СППР), которые выполняют функции цифровых помощников для операторов, диспетчеров и инженеров [12–16]. Такие системы анализируют большие массивы данных, формируют рекомендации по управлению технологическими процессами и предупреждают о возможных нарушениях [6, 18]. Это позволяет снизить влияние человеческого фактора и повысить точность управленческих решений [7, 10].

Примером успешного внедрения ИИ является компания «Норникель», где используются технологии компьютерного зрения, предиктивной аналитики и интеллектуального контроля технического состояния оборудования [4, 6]. Существенный эффект достигается также на предприятиях, использующих концепцию «Цифровой карьер», где ИИ прогнозирует отказы карьерной техники и оптимизирует ремонтные процессы [4, 16].

Несмотря на положительные результаты, практика внедрения ИИ сталкивается с рядом ограничений. Среди них – высокая стоимость внедрения, недостаточная цифровая инфраструктура, дефицит квалифицированных специалистов, сложности интеграции новых систем в существующие производственные процессы и необходимость совершенствования нормативного регулирования [19].

Таким образом, существующие практики использования искусственного интеллекта на горнодобывающих предприятиях подтверждают его высокую эффективность в обеспечении промышленной безопасности [7, 8]. ИИ позволяет не только повышать производственную надежность и снижать аварийность, но и формирует основу для перехода к интеллектуальному и предиктивному управлению безопасностью в горной промышленности [9, 13].

Российский и зарубежный опыт внедрения искусственного интеллекта в горной промышленности

Внедрение искусственного интеллекта в горной промышленности является одним из ключевых направлений цифровой трансформации отрасли как в России, так и за рубежом [4, 6, 13]. Современные горнодобывающие предприятия стремятся повысить уровень промышленной безопасности, снизить аварийность, оптимизировать производственные процессы и сократить влияние человеческого фактора [2, 13]. Практика показывает, что ИИ становится эффективным инструментом решения этих задач [8, 9].

Российский опыт внедрения искусственного интеллекта

В России применение ИИ в горнодобывающей отрасли активно развивается на крупных предприятиях металлургического, угольного и сырьевого комплексов [4, 5]. Основное внимание уделяется вопросам промышленной безопасности, контролю состояния оборудования и автоматизации технологических процессов [2, 6] (рисунок).

Представленный рисунок отражает практические направления применения искусственного интеллекта на различных горнодобывающих предприятиях и демонстрирует его роль в повышении уровня промышленной безопасности, эффективности производства и снижении производственных рисков. Систематизированы основные предприятия и технологические решения, основанные на использовании ИИ, а также показаны конкретные результаты их внедрения.

Первая строка рисунка описывает опыт компании «Норникель», где применяются технологии предиктивной аналитики и компьютерного зрения. Данные решения позволяют осуществлять контроль опасных зон, прогнозировать отказы оборудования, отслеживать состояние агрегатов и использовать цифровых помощников. В результате достигается снижение аварийности и простоев, а также выявление неисправностей на ранних стадиях, что обеспечивает значительный экономический эффект.



Рис. **Примеры внедрения искусственного интеллекта на предприятиях горнодобывающих отраслей России /**
Fig. **Examples of AI implementation in mining enterprises in Russia**

Вторая строка отражает опыт Solidcore Resources (Бакырчикское горнодобывающее предприятие), где внедрены системы искусственного интеллекта в области медико-биометрического контроля персонала. Использование автоматизированных предсменных медицинских осмотров позволяет выявлять признаки усталости и отклонений состояния здоровья работников, а также обеспечивать цифровой допуск к работе. Это способствует снижению риска допуска сотрудников в опасном состоянии и уменьшению уровня травматизма.

Третья строка характеризует применение ИИ на угольных шахтах, где основное внимание уделяется мониторингу газовой среды и пылевой нагрузки. Системы искусственного интеллекта контролируют концентрацию метана, угольной пыли, анализируют аэрологическую безопасность и прогнозируют опасные состояния шахтной атмосферы. Это позволяет своевременно предотвращать аварии, такие как взрывы и пожары, а также снижать профессиональные риски для работников.

Четвертая строка описывает систему «Цифровой карьер», основанную на прогнозной аналитике оборудования. ИИ используется для анализа вибраций и температурных параметров техники, прогнозирования возможных поломок и планирования технического обслуживания. В результате снижается количество внеплановых простоев, повышается надежность оборудования и общий уровень промышленной безопасности.

Пятая строка отражает использование систем поддержки принятия решений (СППР) на горнодобывающих предприятиях. Такие системы предоставляют операторам техники, машинистам и водителям интеллектуальные рекомендации, помогают контролировать технологические процессы и снижать вероятность ошибок персонала. Это способствует уменьшению влияния человеческого фактора и повышению безопасности производства.

В целом таблица наглядно демонстрирует, что внедрение искусственного интеллекта в горнодобывающей отрасли охватывает ключевые направления: контроль безопасности, мониторинг производственной среды, прогнозирование отказов оборудования и поддержку принятия решений. Совокупное применение этих технологий обеспечивает повышение эффективности производства, снижение аварийности и формирование более безопасной и устойчивой системы горного производства.

Зарубежный опыт внедрения искусственного интеллекта

Международная практика показывает более высокий уровень интеграции ИИ в систему управления горным производством [7, 13]. Зарубежные компании активно переходят к концепции «умного рудника» (Smart Mining), где большинство процессов управляется с использованием интеллектуальных систем [13, 19].

Одним из лидеров является компания Rio Tinto (Австралия), где используются автономные карьерные самосвалы, роботизированные буровые установки и интеллектуальные системы диспетчеризации [20]. ИИ обеспечивает управление техникой без участия человека, что значительно снижает риск производственного травматизма и повышает производительность [13, 20].

Компания BHP (Австралия) применяет цифровые двойники месторождений, системы прогнозирования отказов оборудования и интеллектуальные платформы управления производственными процессами [17]. Это позволяет моделировать аварийные сценарии, оптимизировать логистику и минимизировать риски [14, 17].

Компания Anglo American (Великобритания) внедряет системы машинного обучения для анализа геологических данных, прогнозирования устойчивости пород и повышения точности буровзрывных работ [19]. Также активно используются интеллектуальные системы контроля состояния оборудования и персонала [7, 19].

В Канаде и США широко применяются беспилотные летательные аппараты (дроны) с элементами ИИ для мониторинга состояния карьеров, обследования труднодоступных участков и оценки геомеханических рисков [7, 18].

Сравнительный анализ российского и зарубежного опыта

Сравнение показывает, что в России основное внимание сосредоточено на локальных решениях в области безопасности и контроля оборудования, тогда как зарубежные компании чаще реализуют комплексную цифровую трансформацию всего предприятия [4, 7, 15].

Российские предприятия в большей степени используют ИИ для мониторинга опасных факторов [5]; контроля промышленной безопасности; прогнозирования отказов оборудования [9, 16]; медицинского контроля персонала [12].

Зарубежные предприятия активно развивают: полностью автономные производственные системы [13, 20]; цифровые двойники предприятий [14, 17]; роботизированные комплексы [16, 20]; интеллектуальные логистические платформы [19, 20]; интеграцию ИИ в стратегическое управление производством [7, 13].

Главными ограничениями в России остаются высокая стоимость внедрения, недостаточная цифровая инфраструктура, кадровый дефицит и несовершенство нормативно-правовой базы [4, 19].

Российский и зарубежный опыт показывает высокую эффективность применения искусственного интеллекта в горной промышленности [7, 8]. ИИ позволяет значительно повысить уровень промышленной безопасности, снизить аварийность, сократить производственные затраты и обеспечить переход к интеллектуальному управлению производством [9, 13]. Перспективным направлением для российских предприятий является переход от отдельных ИИ-решений к созданию единой цифровой экосистемы безопасного и эффективного горного производства [4, 7, 14].

Проблемы и ограничения применения искусственного интеллекта в горном деле

Несмотря на значительные преимущества внедрения искусственного интеллекта в горной промышленности, его практическое применение сопровождается рядом серьезных проблем и ограничений [4, 6, 7]. Горнодобывающая отрасль относится к числу наиболее сложных и опасных сфер производства, где любые ошибки могут привести к авариям, значительным экономическим потерям и угрозе жизни работников [2]. Поэтому внедрение ИИ требует не только технической готовности, но и комплексного организационного, кадрового и нормативного обеспечения [10, 15].

Одной из главных проблем является высокая стоимость внедрения ИИ-технологий [4, 12, 15–17]. Для полноценного

функционирования интеллектуальных систем необходимы значительные инвестиции в цифровую инфраструктуру: датчики, сенсоры, системы мониторинга, серверное оборудование, каналы передачи данных, программное обеспечение и аналитические платформы [10, 14]. Особенно сложной задачей это становится для предприятий с устаревшей технической базой, где модернизация требует крупных финансовых затрат [2, 4].

Серьезным ограничением выступает недостаточный уровень цифровой инфраструктуры на многих предприятиях [4, 14]. Для эффективной работы ИИ требуется непрерывный поток качественных данных в режиме реального времени, однако на практике многие шахты и карьеры не оснащены необходимыми средствами автоматизированного контроля [5, 16]. Отсутствие современных датчиков, нестабильная связь в подземных условиях и несовместимость различных систем затрудняют полноценное внедрение ИИ [9].

Важной проблемой является дефицит квалифицированных кадров [4, 19]. Для разработки, внедрения и эксплуатации ИИ-систем необходимы специалисты, обладающие знаниями одновременно в области горного дела, промышленной безопасности, анализа данных и информационных технологий [6, 10]. На многих предприятиях отсутствуют такие специалисты, а уровень цифровой подготовки инженерно-технического персонала остается недостаточным [2, 16]. Это снижает эффективность использования даже уже внедренных решений [12].

Существенным ограничением является качество исходных данных. Искусственный интеллект напрямую зависит от достоверности, полноты и актуальности информации, на основе которой строятся прогнозы и принимаются решения [7, 10]. Ошибки в данных, некорректная работа датчиков, отсутствие исторической информации и разрозненность информационных потоков могут привести к неправильным выводам системы и снижению надежности прогнозирования [6, 12].

Особую значимость имеет проблема кибербезопасности и надежности ИИ-систем [15]. Интеллектуальные платформы работают с критически важной производственной информацией, а нарушение их работы может привести к серьезным аварийным последствиям. Возрастают риски несанкционированного доступа, кибератак, потери данных и отказов программного обеспечения [15]. В условиях горного производства даже кратковременный сбой может иметь высокую цену [2, 10].

Не менее важным ограничением является несовершенство нормативно-правовой базы. В настоящее время законодательство в сфере промышленной безопасности недостаточно адаптировано к широкому применению ИИ [7]. Отсутствуют четкие стандарты сертификации интеллектуальных систем, механизмы распределения ответственности за ошибки алгоритмов, требования к качеству данных и правовое регулирование автоматизированного принятия решений [15]. Это создает правовую неопределенность и сдерживает внедрение новых технологий [7, 10].

Проблемой также является психологическое сопротивление персонала и организационные барьеры [12, 15]. Внедрение ИИ часто воспринимается работниками как угроза сокращения рабочих мест или усиления контроля [15, 16]. Отсутствие доверия к автоматизированным решениям, низкая цифровая культура и сопротивление изменениям могут существенно замедлять процессы цифровой трансформации предприятия [4, 10].

Дополнительным ограничением выступает сложность интеграции ИИ в существующие производственные процессы [4, 14]. На практике новые интеллектуальные системы должны работать совместно с уже действующим оборудованием, программными комплексами и регламентами предприятия [3, 16]. Несовместимость технологий, необходимость остановки производственных процессов для модернизации и высокая сложность настройки систем создают дополнительные трудности [9, 15].

Таким образом, применение искусственного интеллекта в горном деле сопровождается рядом технических, экономических, организационных и правовых ограничений [4, 7].

Для успешного внедрения ИИ необходимо комплексное решение таких проблем, как развитие цифровой инфраструктуры, подготовка кадров, совершенствование нормативной базы, повышение кибербезопасности, формирование культуры цифрового управления [10, 14, 15].

Только при системном подходе искусственный интеллект сможет стать полноценным инструментом повышения безопасности и эффективности горного производства [9, 16].

Организационный механизм внедрения искусственного интеллекта

Эффективное внедрение искусственного интеллекта в горной промышленности требует не только технического оснащения предприятий, но и совершенствования организационного механизма управления этими процессами [4, 6, 7]. Практика показывает, что даже при наличии современных цифровых технологий отсутствие четкой системы управления, подготовленных кадров и нормативной базы значительно снижает результативность применения ИИ [10, 15]. Поэтому одним из ключевых направлений развития становится формирование устойчивого организационного механизма внедрения интеллектуальных систем [7, 20].

Прежде всего необходимо создание единой стратегии цифровой трансформации предприятия, в которой применение ИИ должно рассматриваться как часть общей системы промышленной безопасности и производственного управления [4, 14]. Важно определить цели внедрения, ожидаемые результаты, этапы реализации, ответственных лиц и показатели эффективности [7, 15]. Без стратегического подхода внедрение ИИ носит фрагментарный характер и не обеспечивает системного эффекта [10, 13].

Важнейшим элементом является формирование цифровой инфраструктуры предприятия [10, 20]. Для полноценной работы ИИ необходима развитая система датчиков, сенсоров, автоматизированных систем контроля, каналов передачи данных и вычислительных мощностей [5, 10]. Организационный механизм должен предусматривать интеграцию всех источников информации в единую цифровую платформу, обеспечивающую непрерывный сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени [4, 7].

Особое значение имеет создание системы управления ИИ-решениями [12, 15]. На предприятии должны быть определены подразделения и специалисты, отвечающие за эксплуатацию, контроль и развитие интеллектуальных систем [6, 12]. Это могут быть центры цифровой безо-

пасности, аналитические службы, отделы промышленной аналитики и технического сопровождения ИИ [10, 15]. Необходимо установить порядок взаимодействия между производственными службами, IT-подразделениями и руководством предприятия [4, 14].

Неотъемлемой частью организационного механизма является подготовка кадров и развитие цифровых компетенций персонала [6, 10]. Для эффективной работы ИИ недостаточно только наличия программных решений – сотрудники должны понимать принципы их функционирования, уметь интерпретировать результаты анализа и принимать управленческие решения на их основе [7, 12]. Это требует регулярного повышения квалификации, внедрения программ обучения, подготовки специалистов по анализу данных, инженеров по ИИ и цифровых аналитиков [3, 14, 17].

Важным направлением выступает совершенствование нормативно-регламентной базы предприятия. Необходимо разработать внутренние стандарты использования ИИ, регламенты работы с данными, правила принятия решений на основе интеллектуальных систем, а также порядок ответственности за действия автоматизированных алгоритмов [15]. Это особенно важно в вопросах промышленной безопасности, где ошибка может привести к серьезным последствиям.

Следующим элементом является оценка эффективности внедрения ИИ [12, 15]. Организационный механизм должен включать систему показателей, позволяющих оценивать влияние ИИ на снижение аварийности, уменьшение простоев оборудования, повышение производительности и снижение затрат [9, 12]. Постоянный контроль эффективности позволяет корректировать процессы внедрения и обеспечивать устойчивое развитие цифровой системы предприятия [7, 10].

Также необходимо уделять внимание вопросам кибербезопасности и надежности ИИ-систем [15]. Поскольку интеллектуальные системы работают с критически важной производственной информацией, требуется защита данных, резервирование систем, контроль доступа и предотвращение внешних угроз [10]. Организационная структура должна предусматривать механизмы обеспечения устойчивости цифровой инфраструктуры [7, 15].

Таким образом, совершенствование организационного механизма внедрения ИИ представляет собой комплексную задачу, включающую стратегическое управление, цифровую инфраструктуру, кадровое обеспечение, нормативное регулирование и систему контроля эффективности [7, 14]. Только при системном подходе искусственный интеллект сможет стать полноценным инструментом повышения безопасности и эффективности горного производства [6, 13].

Выводы

1. В условиях современного развития промышленности вопросы обеспечения безопасности горного производства приобретают особую значимость. Горнодобывающая отрасль традиционно относится к числу наиболее опасных сфер деятельности, поскольку связана с высоким уровнем производственных рисков, сложными технологическими процессами, воздействием вредных факторов и высокой вероятностью возникновения аварийных ситуаций. В этих условиях применение искусственного интеллекта становится важнейшим направлением повышения уровня промышленной безопасности и устойчивости производственных процессов.

2. В ходе исследования было установлено, что искусственный интеллект представляет собой эффективный инструмент предупреждения аварий, контроля состояния оборудования, мониторинга производственной среды и снижения влияния человеческого фактора. Наиболее востребованными направлениями применения ИИ в горной промышленности являются интеллектуальный мониторинг опасных факторов, предиктивная аналитика, цифровые двойники, роботизация производственных процессов, системы поддержки принятия решений и интеграция всех цифровых решений в единую систему управления безопасностью предприятия.

3. Анализ практики внедрения ИИ на российских и зарубежных горнодобывающих предприятиях показал, что использование интеллектуальных систем позволяет значительно снизить аварийность, уменьшить количество внеплановых простоев оборудования, повысить производительность труда и улучшить условия охраны труда. Особенно эффективными являются технологии компьютерного зрения, автоматизированного контроля газовой среды, прогнозирования отказов техники и цифрового сопровождения персонала.

4. Вместе с тем были выявлены и существенные проблемы внедрения ИИ, среди которых недостаточный уровень цифровой инфраструктуры, дефицит квалифицированных кадров, высокая стоимость внедрения, вопросы кибербезопасности, а также несовершенство нормативно-правового регулирования. Эти факторы существенно ограничивают возможности широкого применения интеллектуальных технологий в системе промышленной безопасности.

5. В работе обосновано, что перспективы развития ИИ в горной промышленности связаны с переходом к предиктивной модели управления безопасностью, созданием цифровых двойников предприятий, развитием автономных и роботизированных систем, совершенствованием организационного механизма внедрения ИИ и формированием единой цифровой экосистемы предприятия. Особое значение имеет развитие кадрового потенциала и создание эффективной системы управления интеллектуальными решениями.

6. На основе проведенного анализа были разработаны рекомендации по повышению эффективности применения ИИ, включающие поэтапное внедрение цифровых технологий, создание единой платформы управления безопасностью, совершенствование внутренней нормативной базы, подготовку специалистов, обеспечение кибербезопасности и постоянную оценку эффективности внедренных решений.

7. Таким образом, поставленная цель исследования достигнута, а задачи выполнены в полном объеме. Применение искусственного интеллекта в вопросах безопасности горного производства является не только перспективным, но и необходимым условием устойчивого развития горнодобывающей отрасли. Внедрение интеллектуальных технологий позволяет сформировать новую модель промышленной безопасности, основанную на прогнозировании, предотвращении рисков и повышении общей эффективности производственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мельник В.В., Кузнецов Ю.Н., Абрамкин Н.И. Основы горного дела (Подземная геотехнология): практикум. Москва, 2019: 129.
   Melnik V.V., Kuznetsov Yu.N., Abramkin N.I. Fundamentals of Mining (Underground Geotechnology): Workshop. Moscow, 2019: 129. (In Russ.).
2. Беккер А.А. Промышленная безопасность в горной промышленности. Москва, 2021: 312.
   Becker A.A. Industrial Safety in the Mining Industry. Moscow, 2021: 312. (In Russ.).
3. Трубецкой К.Н., Хохлов С.В. Горные машины и комплексы. Москва, 2019: 380.
   Trubetskoy K.N., Khokhlov S.V. Mining Machines and Systems. Moscow, 2019: 380. (In Russ.).
4. Лукичев С.В. Цифровые горные технологии – импортозамещение и технологическая независимость. *Горная промышленность*. 2023; 5: 4-9.
   Lukichev S.V. Digital Mining Technologies – Import Substitution and Technological Independence. *Mining Industry*. 2023; 5: 4-9. (In Russ.).
5. Лукичев С.В. Цифровые горные технологии – импортозамещение и технологическая независимость. *Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле»*. Апатиты, 2023: 31-32.
   Lukichev S.V. Digital Mining Technologies – Import Substitution and Technological Independence. *Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Digital Technologies in Mining».* Apatity, 2023: 31-32. (In Russ.).
6. Гарбук С.В., Позднеев Б.М., Иванов А.В. и др. Перспективы стандартизации для развития применения технологий искусственного интеллекта в станкоинструментальной промышленности. *Станкоинструмент*. 2024; 1: 34-42.
   Garbuk S.V., Pozdneev B.M., Ivanov A.V., et al. Prospects of standardization for the development of artificial intelligence technologies in the machine tool industry. *Machine tool.* 2024; 1: 34-42. (In Russ.).
7. Azhari M., et al. The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines. *Sensors*. 2023; 23 (9): 4294. https://doi.org/10.3390/s23094294.
8. Нурбердыев Р., Пантасов О. Искусственный интеллект в автоматизации горных работ. *Инновационная наука*. 2024; 10: 20-22.
   Nurberdiev R., Pantasov O. Artificial Intelligence in the Automation of Mining Operations. *Innovative Science.* 2024; 10: 20-22. (In Russ.).
9. Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р. и др. Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова.* 2021; 4: 5-15.
   Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., et al. Predictive Analytics Tools in Minimizing Failures of Mining and Transport Equipment*. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University.* 2021; 19 (4): 5-15. (In Russ.).
10. Щербина А.В. Big data в повышении промышленной безопасности. *Одиннадцатая международная научно-практическая конференция BIG DATA and Advanced Analytics*. Минск, 2025: 27-30.
    Shcherbina A.V. Big data in improving industrial safety. *Eleventh International Scientific and Practical Conference BIG DATA and Advanced Analytics.* Minsk, 2025: 27-30. (In Russ.).
11. Imam M., Baïna K., Tabii Y., et al. The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines. *Sensors.* 2023; 23 (9): 4294. https://doi.org/10.3390/s23094294.
12. Палладина Я.А., Рябишина Л.А., Иксанов И.Х. и др. Роль системы поддержки принятия решений в обеспечении пожарной и промышленной безопасности технологических процессов нефтегазового производства. *Нефтегазовое дело*. 2023; 5: 5-19. (In Russ.).
    Palladina Ya.A., Ryabishina L.A., Iksanov I.Kh., et al. The role of the decision support system in ensuring fire and industrial safety of technological processes in oil and gas production. *Oil and gas engineering.* 2023; 5: 5-19. (In Russ.).
13. Chatterjee C., Sindhwani R., Mangla S.K., et al. Digitization of the mining industry: Pathways to sustainability through enabling technologies. *Resources Policy*. 2024; 93: 105450. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105450.
14. Кудряшова В.А., Назаров А.Ю., Разаков М.А. Цифровые двойники и информационные технологии в промышленности. *Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ»*. 2023; 4: 88-98.
    Kudryashova V.A., Nazarov A.Yu., Razakov M.A. Digital twins and information technologies in industry. *Electronic network polythematic journal «Scientific Works of KubSTU».* 2023; 4: 88-98. (In Russ.).
15. Горбатко Е.С., Гуськов А.В. Риски цифровой трансформации промышленных предприятий. *Вестник Академии знаний*. 2026; 2 (73): 144-146.
    Gorbatko E.S., Guskov A.V. Risks of digital transformation of industrial enterprises. *Bulletin of the Academy of Knowledge.* 2026; 2 (73): 144-146. (In Russ.).
16. Коваленко В.С., Зырянов И.В. Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2025; (5): 124-130.
    Kovalenko V.S., Zyryanov I.V. Automation and robotization of mining operations – the modern stage of transition to highly productive and safe open-pit mining. *Mining Industry.* 2025; (5): 124-130. (In Russ.).
17. Onifade M., Adebisi J.A., Shivute A.P., et al. Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. *Resources Policy*. 2023; 85: 103978. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103978.
18. Anglo American. FutureSmart Mining Report. 2022. URL: https://southafrica.angloamerican.com/~/media/Files/A/Anglo-American-Group- 9/PLC/investors/annual-reporting/2022/aa-annual-report-2022.pdf.
19. Rio Tinto. Autonomous Haulage System Overview. *Australia.* 2022. URL: https://minedocs.com/23/Rio_Tinto-AR-2022.pdf.
20. Qiang X., Li G., Hou J., et al. Intelligent Safety Risk Analysis and Decision-Making System for Underground Metal Mines Based on Big Data. *Sustainability*. 2023; 15 (13): 10086. https://doi.org/10.3390/su151310086.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Аркадиевич Атрушкевич –
д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела моделирования геотехнических систем, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: iugi@mail.ru

Сергей Михайлович Попов –
д-р экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования горнотехнических систем, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0003-0689-3260;
e-mail: s.popov@inbox.ru

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 09.05.2026
Поступила после рецензирования: 14.09.2026
Принята к публикации: 20.09.2026

ABOUT THE AUTHORS

Victor A. Atrushkevich –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
e-mail: iugi@mail.ru

Sergey M. Popov –
Dr. Sci. (Econ.), Leading Researcher at the Laboratory 2.3 of Mining Systems Modeling, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0003-0689-3260;
e-mail: s.popov@inbox.ru

Contribution:
The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 09.05.2026
Revised: 14.09.2026
Accepted: 20.09.2026