УДК 658:622.7:004.9 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-155-163

Проблемы цифровой трансформации как драйвера инновационного развития горно-обогатительных предприятий

Александр Борисович ФИРСОВ

Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью цифровизации горно-обогатительных предприятий для повышения их эффективности и конкурентоспособности. Несмотря на потенциал ИИ и автоматизации, внедрение технологий сдерживают высокие затраты, нехватка квалифицированных кадров и разрозненность данных. Исследование этих проблем поможет ускорить модернизацию отрасли.

Целью работы является выявление ключевых проблем цифровой трансформации горно-обогатительных предприятий и определение путей их преодоления для обеспечения устойчивого инновационного развития отрасли. Исследование направлено на анализ технологических, организационных и кадровых барьеров, сдерживающих внедрение цифровых решений, а также на поиск эффективных механизмов их устранения с учетом современных тенденций автоматизации и использования искусственного интеллекта.

Методы исследования включали анализ современных тенденций цифровизации горной отрасли, оценку барьеров внедрения технологий (ИИ, IoT, Big Data) и их влияния на производственные процессы, а также изучение кейсов ведущих предприятий (например, Rio Tinto и Актогайского месторождения).

Результаты работы и область применения. Выявлены ключевые проблемы цифровой трансформации: высокие затраты, дефицит кадров, разрозненность данных. Показаны перспективы внедрения цифровых двойников, предиктивной аналитики и автономных систем. Результаты полезны для руководителей предприятий, инженеров и исследователей, занимающихся модернизацией отрасли.

Выводы. Цифровая трансформация горно-обогатительных предприятий является ключевым фактором их инновационного развития в условиях глобализации и ужесточения экологических требований. Проведенное исследование подтвердило, что внедрение технологий искусственного интеллекта, промышленного интернета вещей и цифровых двойников способно значительно повысить эффективность добычи и переработки сырья, оптимизировать ресурсопотребление и минимизировать техногенное воздействие на окружающую среду. Однако успешная реализация этих технологий требует комплексного подхода, включающего не только техническую модернизацию, но и преодоление организационных барьеров, адаптацию кадрового потенциала, разработку отраслевых стандартов данных и создание гибких систем управления.

***Ключевые слова*:** цифровая трансформация, горно-обогатительные предприятия, инновационное развитие, автоматизация, искусственный интеллект, большие данные, интернет вещей, ресурсоэффективность, экологическая устойчивость, кибербезопасность.

Введение

В настоящее время Россия занимает одно из ведущих мест в мире по добыче и переработке полезных ископаемых, являясь крупным поставщиком минерального сырья на глобальный рынок. Горно-обогатительные предприятия – это промышленные комплексы, специализирующиеся на добыче полезных ископаемых и их последующем обогащении для повышения качества и пригодности сырья для дальнейшего использования. Их сущность заключается в комплексной переработке рудного и нерудного сырья с целью выделения ценных компонентов и удаления пустой породы. Данные предприятия играют ключевую роль в горнодобывающей отрасли, поскольку сырье, добытое из недр, часто содержит низкие концентрации полезных элементов и требует технологической обработки.

Процесс работы горно-обогатительных предприятий включает несколько этапов: добычу руды, ее дробление, измельчение, сортировку и обогащение с применением различных методов (гравитационных, флотационных, магнитных и др.). В результате получают концентрат с высоким содержанием целевого компонента (металла, минерала или химического соединения), который затем направляется на металлургические, химические или другие производства.

На фоне истощения богатых месторождений и необходимости освоения трудноизвлекаемых запасов в сложных климатических условиях традиционные методы добычи становятся экономически неэффективными. Параллельно ужесточающиеся экологические нормативы вынуждают пересматривать существующие технологии в

✉firsovalexander99@gmail.ru
https://orcid.org/0009-0005-9703-4593

сторону снижения техногенного воздействия. В этом контексте цифровая трансформация предстает как стратегический инструмент, способный одновременно решить задачи повышения рентабельности и минимизации экологических рисков.

Эволюция горного дела демонстрирует интересную динамику: от многовековой ручной добычи через механизацию промышленной революции к современной эпохе, где когнитивные технологии начинают определять вектор развития. Особенность текущего этапа заключается в синтезе цифровых и биотехнологических решений, создающем уникальные гибридные системы управления производственными процессами. Искусственный интеллект, первоначально выполнявший узкие задачи автоматизации, трансформировался в автономную систему принятия решений, имитирующую когнитивные функции человека.

Внедрение интеллектуальных систем мониторинга и управления сталкивается с рядом институциональных и инфраструктурных барьеров. Помимо значительных капитальных затрат, серьезным ограничением становится дефицит специалистов, способных работать с современными киберфизическими системами. Не менее важной проблемой остается необходимость синхронной модернизации нормативной базы, которая зачастую отстает от темпов технологического развития [1].

Перспективные направления цифровизации охватывают весь производственный цикл – от интеллектуальной разведки месторождений до оптимальной переработки сырья. Передовые предприятия уже демонстрируют эффективность решений на основе промышленного интернета вещей и предиктивной аналитики, позволяющих не только оперативно корректировать технологические параметры, но и прогнозировать состояние оборудования. Однако полноценная цифровая трансформация требует комплексного пересмотра всей системы управления предприятием, включая подготовку кадров нового поколения и создание адаптивных организационных структур. Особую актуальность приобретают вопросы кибербезопасности, так как возрастающая зависимость от цифровых систем делает предприятия уязвимыми перед новыми видами технологических рисков [2].

Современные технологии искусственного интеллекта кардинально преобразуют подходы к геологоразведке и добыче полезных ископаемых, создавая принципиально новые возможности для анализа геологических данных и оптимизации производственных процессов. Интеграция машинного обучения в горнодобывающую отрасль позволяет не только ускорять поиск новых месторождений, но и существенно повышать эффективность эксплуатации уже действующих предприятий. Ярким примером такого подхода является опыт Актогайского медного месторождения в Казахстане, где внедрение интеллектуальной системы TRIT-AI привело к значительному улучшению технологических показателей.

На Актогайском месторождении, где запасы меди оцениваются в среднем в 0,27–0,34 %, применение искусственного интеллекта позволило оптимизировать весь цикл обогащения руды – от добычи до флотации [3]. Разработанная система, проанализировав более 500 млн исторических данных, продолжает постоянно совершенствоваться, предлагая персоналу ценные рекомендации по повышению эффективности производства. Результаты внедрения оказались настолько впечатляющими, что аналогичные решения начали применяться на других предприятиях группы KAZ Minerals, включая Бозшакольское месторождение. Это позволило компании не только увеличить объемы переработки руды, но и снизить удельные затраты на производство меди.

Особого внимания заслуживает сотрудничество с компанией Motion Metrics, направленное на создание интеллектуальной системы управления технологической цепочкой *рудник–обогатительная фабрика*. Данное решение анализирует гранулометрический состав руды на всех этапах переработки, что позволяет оптимизировать энергопотребление и предотвращать простои оборудования. Такой комплексный подход демонстрирует, как современные технологии могут одновременно решать задачи повышения эффективности и обеспечения промышленной безопасности.

В России также активно развиваются подобные инициативы. Ярким примером является сотрудничество Вилюйской геологоразведочной экспедиции с «Газпромнефть-ГЕО» по применению нейросетей для анализа геологических данных. Особый интерес представляет эксперимент по использованию ChatGPT для интерпретации геологической информации, который может открыть новые перспективы в обработке больших массивов данных. Создание Альянса AI-Russia с участием ведущих российских компаний свидетельствует о серьезных намерениях в области развития искусственного интеллекта в промышленности.

Перспективы применения ИИ в минерально-сырьевом комплексе выходят далеко за рамки текущих достижений. Уже в ближайшие годы можно ожидать появления интеллектуальных систем, способных не только анализировать данные, но и самостоятельно принимать решения по оптимизации производственных процессов. Особенно важным становится развитие технологий 3D-инверсии и автоматизированной обработки геоданных, которые могут сократить сроки освоения новых месторождений в два раза.

Динамика объема рынка продуктов технологии искусственного интеллекта в России представлена на рис. 1.

Если первоначально такие системы использовались преимущественно для решения узкоспециализированных задач, то современные когнитивные платформы способны осуществлять комплексное управление предприятием, учитывая технологические, экономические и экологические аспекты. Это стало возможным благодаря развитию эвристических алгоритмов, позволяющих системам ИИ не только обрабатывать данные по заданным правилам, но и формировать новые стратегии управления на основе анализа многомерных взаимосвязей [5].

Экономический эффект от внедрения искусственного интеллекта проявляется в различных аспектах: от сокращения операционных издержек до минимизации регуляторных рисков. Как показывают исследования, компании, активно инвестирующие в цифровые технологии, получают значительные конкурентные преимущества за счет

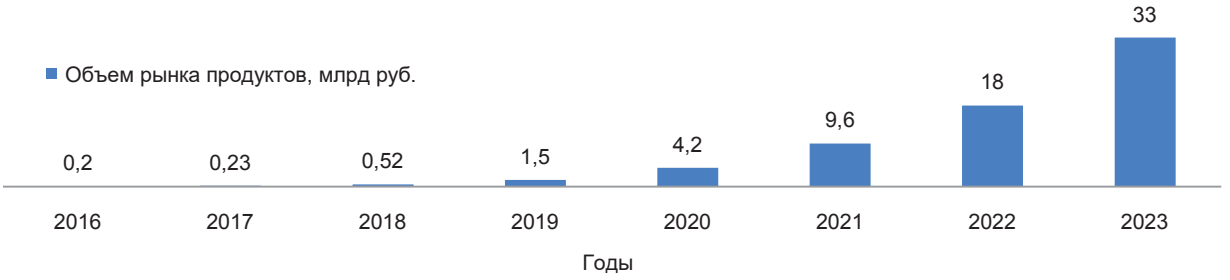

Рисунок 1. Динамика объема рынка продуктов технологии искусственного интеллекта в России, млрд руб. [4]
Figure 1. Dynamics of the market volume of artificial intelligence technology products in Russia, billion rubles [4]

повышения производительности и снижения себестоимости продукции. В условиях глобализации рынка минеральных ресурсов это становится критически важным фактором успеха.

Современный этап цифровизации горнодобывающей промышленности характеризуется стремительным внедрением когнитивных технологий, трансформирующих традиционные подходы к управлению производственными процессами. Анализ российского рынка решений на основе искусственного интеллекта демонстрирует устойчивую положительную динамику, что свидетельствует о возрастающем спросе на цифровые инновации в отрасли. В ближайшей перспективе ожидается переход от фрагментарного использования ИИ к созданию комплексных интеллектуальных экосистем, охватывающих все этапы производственного цикла – от геологоразведки до логистики готовой продукции.

Передовые технологические решения в горнодобывающем секторе сегодня включают целый спектр инновационных подходов. Системы дополненной реальности создают цифровые двойники производственных объектов, обеспечивающие оперативный доступ к критически важной информации. Виртуальные симуляторы позволяют моделировать сложные технологические процессы и отрабатывать нештатные ситуации без риска для реального производства. Автономные роботизированные комплексы, оснащенные системами компьютерного зрения, осуществляют мониторинг состояния оборудования и параметров рудного тела с беспрецедентной точностью. Особого внимания заслуживает опыт международных корпораций, таких как Rio Tinto [6], где технологии распределенного реестра обеспечивают сквозную прослеживаемость цепочек поставок, а предиктивная аналитика позволяет оптимизировать логистические маршруты в режиме реального времени.

Трансформация бизнес-процессов под влиянием цифровых технологий затрагивает и систему управления предприятиями. Современные ERP-системы, обогащенные алгоритмами машинного обучения, сокращают циклы планирования с нескольких недель до нескольких дней, обеспечивая оперативное реагирование на изменения рыночной конъюнктуры. Интеграция с цифровыми платформами ведущих технологических компаний открывает доступ к передовым аналитическим инструментам и облачным сервисам. Динамические обучающие системы, построенные на принципах адаптивного обучения, позволяют персоналу быстро осваивать новые компетенции в условиях непрерывного технологического обновления.

При этом финансовая нагрузка на предприятия, внедряющие инновационные решения, требует тщательного экономического обоснования инвестиций в НИОКР. Проблема информационной безопасности приобретает особую остроту в условиях роста киберугроз и промышленного шпионажа. Глубокая трансформация бизнес-моделей зачастую встречает сопротивление со стороны традиционных управленческих структур, ориентированных на краткосрочные финансовые результаты. Особую сложность представляет оценка эффективности цифровизации, так как традиционные методы анализа конкурентоспособности не всегда адекватно отражают преимущества технологических инноваций.

Методологические сложности возникают при попытке количественной оценки влияния цифровых технологий на конкурентоспособность предприятия. Существующие методики зачастую не учитывают латентный эффект от внедрения ИИ, который может проявляться в улучшении качества управленческих решений или снижении операционных рисков. Парадокс заключается в том, что технологическое лидерство не всегда напрямую коррелирует с финансовыми показателями, особенно в краткосрочной перспективе. Это создает дополнительные сложности для топ-менеджмента при обосновании инвестиций в цифровую трансформацию перед акционерами.

В условиях российской экономической реальности дополнительные сложности создает необходимость адаптации зарубежных технологических решений к местным производственным условиям. Ограниченный доступ к передовым технологиям в условиях санкционного давления требует развития собственной научно-технической базы и подготовки специалистов нового типа. Тем не менее опыт ведущих российских горнодобывающих компаний показывает, что даже в этих условиях возможно создание эффективных цифровых решений, обеспечивающих конкурентные преимущества на глобальном рынке [7].

Опыт ведущих горнодобывающих компаний убедительно доказывает, что искусственный интеллект перестал быть технологией будущего – он уже сегодня трансформирует отрасль, создавая новые стандарты эффективности и безопасности. По мере развития алгоритмов машинного обучения и увеличения вычислительных мощностей можно ожидать появления еще более совершенных систем, способных кардинально изменить тради-

ционные подходы к геологоразведке и добыче полезных ископаемых.

Феномен цифровой трансформации сегодня выходит далеко за рамки простой технологической модернизации, становясь катализатором глубинных социально-экономических изменений. В контексте горного производства это проявляется в переходе от дискретных систем автоматизации к комплексным когнитивным платформам, способным к самообучению и адаптации. Особую значимость приобретают облачные вычисления, которые в горно-обогатительном комплексе трансформируются в специализированные «геоинформационные облака», объединяющие данные геологоразведки, параметры технологических процессов и рыночные показатели в едином цифровом пространстве.

Технологии обработки больших данных в горной отрасли приобретают особую специфику, связанную с необходимостью анализа гетерогенной информации – от характеристик горных пород до параметров работы обогатительного оборудования. Современные нейросетевые алгоритмы позволяют выявлять скрытые закономерности в этих данных, прогнозируя изменение качества сырья и оптимизируя производственные цепочки. При этом интернет вещей в горно-обогатительном производстве эволюционирует в направлении создания «цифровых двойников» технологического оборудования, обеспечивающих непрерывный мониторинг и предиктивную аналитику всех производственных процессов.

Применение блокчейн-технологий в горно-обогатительном комплексе также приобретает особые черты, связанные с необходимостью обеспечения прозрачности цепочек поставок минерального сырья и подтверждения его происхождения. Это особенно актуально в условиях ужесточения экологических требований и роста спроса на «зеленые» технологии добычи. Современные криптографические методы позволяют создавать неизменяемые цифровые паспорта для каждой партии сырья, фиксируя все этапы его добычи и переработки.

Развитие цифровых технологий в горной отрасли сегодня переживает период качественного скачка, когда отдельные технологические решения интегрируются в единые когнитивные системы управления. Это создает предпосылки для формирования принципиально новой модели горно-обогатительного предприятия – «умного карьера» или «цифровой шахты», где все процессы оптимизируются в реальном времени с учетом множества технологических, экономических и экологических факторов. Такая трансформация требует пересмотра традиционных подходов к управлению производством и подготовки специалистов нового типа, способных работать в условиях цифровой экономики.

Современный этап цифровой трансформации горно-обогатительных предприятий берет свое начало с первых попыток автоматизации отдельных производственных процессов в конце XX в. Однако настоящий прорыв произошел в последние десятилетия, когда стали активно внедряться комплексные системы управления на основе цифровых технологий. Этот переход можно сравнить с революционным скачком, аналогичным переходу от ручной добычи к механизированным процессам в горном деле.

Важным этапом стало внедрение систем автоматизированного контроля технологических параметров, что позволило значительно повысить точность управления производственными процессами. На смену локальным решениям пришли интегрированные платформы, объединяющие все этапы – от геологоразведки до обогащения сырья. Однако, как показала практика, эти системы имели существенные ограничения, что потребовало дальнейшего совершенствования подходов к цифровизации.

Современный этап развития характеризуется переходом к интеллектуальным системам управления, основанным на технологиях искусственного интеллекта и машинного обучения. Особое значение приобретают методы предиктивной аналитики, позволяющие прогнозировать состояние оборудования и оптимизировать производственные процессы. В горно-обогатительном производстве все шире применяются цифровые двойники технологических процессов, системы компьютерного зрения для контроля качества руды и автоматизированные системы управления обогатительным оборудованием.

Перспективными направлениями развития являются:

– внедрение технологий промышленного интернета вещей (IIoT) для создания единого информационного пространства предприятия;

– использование больших данных и когнитивных технологий для оптимизации процессов добычи и переработки;

– разработка адаптивных систем управления, способных самообучаться в процессе работы;

– создание цифровых платформ для управления всем жизненным циклом месторождения.

Особое внимание уделяется развитию технологий дистанционного управления и автономной работы горной техники. Уже сегодня беспилотные карьерные самосвалы и автоматизированные буровые установки демонстрируют высокую эффективность в реальных производственных условиях. Перспективным направлением считается разработка интеллектуальных систем геологоразведки, основанных на обработке данных дистанционного зондирования и сейсмического мониторинга с использованием методов искусственного интеллекта.

Для предприятий, работающих с труднообогатимыми рудами и бедными месторождениями, ключевое значение приобретают технологии цифрового моделирования процессов обогащения. Они позволяют подбирать оптимальные режимы переработки для каждого типа сырья, значительно повышая извлечение полезных компонентов. Развитие когнитивных технологий открывает новые возможности для создания интеллектуальных систем управления обогатительными фабриками, способных адаптироваться к изменяющимся характеристикам поступающей руды.

Одним из наиболее перспективных направлений считается разработка комплексных цифровых платформ, объединяющих все этапы производственного цикла – от геологоразведки до сбыта готовой продукции. Такие системы позволяют не только оптимизировать текущие процессы, но и осуществлять стратегическое планирование развития предприятия на основе анализа больших массивов данных. Особое значение придается созданию систем поддержки принятия решений, использующих ме-

тоды искусственного интеллекта для анализа производственных и рыночных факторов.

Современные технологии цифровой трансформации горно-обогатительных предприятий предполагают создание комплексных интеллектуальных систем, работающих по принципу «цифрового двойника» производства. Эти системы основаны на глубокой интеграции сенсорных сетей, технологий промышленного интернета вещей (IIoT) и когнитивных аналитических платформ, что позволяет осуществлять непрерывный мониторинг и оптимизацию всех технологических процессов. Особое значение приобретают адаптивные алгоритмы управления, способные в реальном времени корректировать параметры работы оборудования в зависимости от изменяющихся характеристик перерабатываемого сырья и рыночной конъюнктуры.

Интеллектуальные системы мониторинга позволяют минимизировать воздействие производства на окружающую среду за счет оптимизации энергопотребления, сокращения выбросов и рационального использования водных ресурсов. Развитие технологий цифрового моделирования дает возможность заранее оценивать экологические последствия принимаемых технологических решений и выбирать наиболее безопасные варианты разработки месторождений.

В условиях перехода к переработке сложных и бедных руд особую актуальность приобретают технологии цифрового моделирования, способные в виртуальной среде воспроизводить физико-химические процессы обогащения. Эти системы, работающие на принципах искусственного интеллекта, позволяют находить оптимальные решения для максимального извлечения ценных компонентов при минимальных энергозатратах. Разрабатываются уникальные алгоритмы, способные анализировать микроструктуру руды и подбирать индивидуальные параметры переработки для каждого конкретного случая.

В процессе цифровизации горной отрасли можно выделить четыре ключевых этапа, которые особенно заметны на примере крупных предприятий, давно работающих в этом направлении (табл. 1).

Первый этап связан с автоматизацией отдельных задач, когда на рынке появилось множество узкоспециализированных компьютерных программ, не связанных между собой. Это позволило локально оптимизировать рабочие процессы, но не оказало существенного влияния на общую технологию производства.

На втором этапе началось комплексное решение групп задач с внедрением информационных систем, объединяющих цифровые инструменты для геологии, маркшейдерии, планирования горных работ и диспетчеризации. В результате сформировались отдельные цифровые пространства, между которыми осуществлялся обмен данными, что повысило эффективность управления процессами.

Третий этап характеризуется развитием цифровой технологии инженерного обеспечения горных работ, где ключевой особенностью стала унификация цифровых инструментов, предпочтительно на единой платформе. Это минимизировало потери времени на обработку и передачу данных, обеспечив работу специалистов в едином цифровом пространстве. Данный этап ознаменовал переход к концепции «Цифрового рудника», где все объекты и процессы представлены в виде динамических моделей, интегрированных в общую систему. Максимальный результат этого этапа – создание бесшовной технологии работы с цифровыми данными.

Четвертый этап – это формирование цифрового двойника, который предполагает онлайн-взаимодействие между реальными объектами (геологической средой, горными выработками, оборудованием, системами мониторинга и персоналом) и их цифровыми моделями. Создание цифрового двойника является конечной целью трансформации, поскольку оно закладывает основу для полной автоматизации и роботизации производства, открывая путь к малолюдным технологиям добычи полезных ископаемых.

Что касается текущего состояния отечественных горнодобывающих предприятий, большинство из них находится на втором этапе. Некоторые компании только переходят от первого ко второму этапу, тогда как наиболее

Таблица 1. Этапы развития автоматизации и цифровизации в горной промышленности
Table 1. Stages of development of automation and digitalization in the mining industry

Наименование этапа	Основные элементы	Результат
Локальная автоматизация отдельных задач	Включает автоматизацию процессов в таких областях, как геология, маркшейдерия, открытая и подземная технологии, геомеханика и диспетчеризация	Повышение эффективности отдельных рабочих процессов за счет их локальной автоматизации
Комплексная автоматизация групп задач	Объединяет системы обеспечения геомеханической безопасности, горно-геологические информационные системы (ГГИС) и системы диспетчеризации, связанные обменом данными	Создание отдельных цифровых пространств для автоматизации взаимосвязанных процессов
Цифровая технология инженерного обеспечения горных работ	Использует локальные вычислительные сети (ЛВС), базы данных, облачные сервисы и концепцию «цифрового рудника»	Интеграция автоматизированных рабочих мест специалистов в единое цифровое пространство
Цифровой двойник и малолюдная технология	Основан на технологиях Wi-Fi, GSM и IoT (Интернета вещей)	Внедрение малолюдных технологий добычи полезных ископаемых, где процессы управляются цифровыми двойниками с минимальным участием человека

прогрессивные уже двигаются в сторону третьего, демонстрируя потенциал для дальнейшего развития цифровых технологий в отрасли [8].

Эти этапы отражают эволюцию от простой автоматизации отдельных задач к созданию сложных интегрированных систем и цифровых двойников, что в итоге приводит к повышению эффективности и безопасности горных работ.

Фундаментальный тренд развития отрасли связан с переходом к шестому технологическому укладу, характеризующемуся повсеместным внедрением цифровых решений. Это предполагает создание комплексных систем виртуального моделирования горно-обогатительных процессов, использование когнитивных технологий для прогнозной аналитики, внедрение роботизированных комплексов и автономных систем управления. Перспективным направлением становится разработка «цифровых двойников» предприятий, позволяющих в виртуальной среде отрабатывать различные сценарии производственных процессов перед их реализацией в физическом мире [9].

Важнейшим аспектом цифровой трансформации является интеграция возобновляемых источников энергии в технологические цепи горно-обогатительных предприятий. Использование солнечных и ветровых электростанций для питания цифровой инфраструктуры и технологического оборудования не только повышает экологичность производства, но и обеспечивает долгосрочную экономическую устойчивость предприятий в условиях ужесточающихся экологических требований и изменяющихся рыночных условий [10].

Принципы рационального природопользования в контексте цифровой трансформации предполагают создание замкнутых технологических циклов с максимальной утилизацией вторичных ресурсов. Современные системы интеллектуального мониторинга и анализа позволяют оптимизировать использование всех компонентов перерабатываемого сырья, включая сопутствующие элементы, которые ранее считались отходами производства. Особое внимание уделяется разработке алгоритмов комплексной переработки минерального сырья, обеспечивающих извлечение широкого спектра полезных компонентов при минимальном воздействии на окружающую среду [11].

Сложности инновационного развития горно-обогатительных предприятий обусловлены рядом взаимосвязанных факторов, среди которых ключевыми являются неготовность отрасли выступать в роли заказчика технологий искусственного интеллекта (ИИ), дефицит качественных данных, финансовые и организационные барьеры, технологическая фрагментация, а также социальные и кадровые проблемы.

Многие компании, включая крупных игроков, таких как Rio Tinto [6], сталкиваются с трудностями в определении конкретных задач, которые можно решить с помощью ИИ, а также в формировании команд и разработке технических заданий. Это связано с недостаточным пониманием возможностей новых технологий и отсутствием четких стратегий их внедрения. Даже при наличии значительных объемов данных, генерируемых в процессе производства, информация часто оказывается разрозненной, неструктурированной или недоступной для анализа. Например, несмотря на обработку терабайтов данных с датчиков оборудования, их интеграция в единую систему требует серьезных инвестиций и усилий, что замедляет развитие цифровых решений.

Финансовые ограничения играют критическую роль, поскольку внедрение передовых технологий, таких как автономная техника, системы прогнозной аналитики или цифровые двойники, требует колоссальных капиталовложений. Такие проекты, как AutoHaul, направленный на автоматизацию железнодорожных перевозок, обходятся в сотни миллионов долларов, что делает их недоступными для средних и небольших предприятий. Кроме того, цифровая трансформация предполагает изменение устоявшихся бизнес-моделей, что нередко встречает сопротивление со стороны персонала и руководства, привыкшего к традиционным методам управления [11–13].

Технологическая неоднородность также создает серьезные препятствия для инноваций. Горно-обогатительные предприятия используют оборудование и программные решения от разных производителей, что затрудняет их совместимость и интеграцию в единую цифровую платформу. Отсутствие отраслевых стандартов усугубляет проблему, делая внедрение облачных систем и других передовых решений еще более сложным и затратным.

Наконец, социальные и кадровые вызовы остаются одним из ключевых барьеров. Автоматизация и внедрение ИИ меняют требования к компетенциям сотрудников: операторам необходимо осваивать управление автономной техникой, а инженерам – работать с алгоритмами машинного обучения. Это требует масштабных программ переподготовки и вызывает сопротивление среди работников, опасающихся изменений в привычных трудовых процессах. Таким образом, инновационное развитие горно-обогатительных предприятий сталкивается с комплексом проблем, требующих системного подхода и значительных ресурсов для их преодоления.

Методы устранения проблем инновационного развития горно-обогатительных предприятий включают комплексный подход, направленный на преодоление технологических, организационных и кадровых барьеров [14, 15]. Прежде всего необходимо развивать компетенции руководства и специалистов в области цифровых технологий через обучение и сотрудничество с ИТ-компаниями, что позволит четко формулировать задачи для внедрения ИИ. Для решения проблемы качества данных требуется создание единых цифровых платформ, агрегирующих и стандартизирующих информацию с датчиков и оборудования, с применением технологий Big Data. Финансовые ограничения можно смягчить за счет государственной поддержки, льготного кредитования и поэтапного внедрения инноваций, начиная с пилотных проектов. Технологическую фрагментацию преодолевают путем разработки отраслевых стандартов и использования открытых API для интеграции разнородных систем. Для снижения сопротивления персонала изменениям важно активно вовлекать сотрудников в процесс цифровизации, проводить переподготовку и создавать новые мотивационные системы, демонстрируя преимущества автоматизации. Совместная работа предприятий, научных центров и вендоров над разработкой адаптированных решений по-

зволит ускорить цифровую трансформацию отрасли при оптимальных затратах.

Заключение

Эволюция горно-обогатительного производства от примитивных ручных методов к современным цифровым технологиям демонстрирует постоянный рост эффективности и экологической безопасности. Однако переход к рыночной экономике внес коррективы в приоритеты развития отрасли, где на первый план часто выходят краткосрочные экономические показатели в ущерб полноте использования минеральных ресурсов и экологическим аспектам. В этих условиях особую значимость приобретает разработка критериев биосферосовместимости цифровых технологий, которые должны стать важным фактором при проектировании современных горно-обогатительных комплексов.

Современный этап цифровой трансформации требует переосмысления традиционных подходов к управлению горно-обогатительными предприятиями. Интеллектуальные системы на основе искусственного интеллекта позволяют находить оптимальный баланс между экономической эффективностью, полнотой использования минеральных ресурсов и экологической безопасностью. Разработка и внедрение таких систем представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую тесного взаимодействия специалистов в области горного дела, информационных технологий, экономики и экологии. Решение этой задачи откроет новые перспективы для устойчивого развития горно-обогатительной отрасли в условиях перехода к цифровой экономике.

Таким образом, цифровая трансформация горно-обогатительных предприятий – это сложный, но неизбежный процесс, от успешности которого зависит будущее всей отрасли. Решение существующих проблем потребует совместных усилий государства, бизнеса и науки, направленных на создание гибких и адаптивных систем, способных обеспечить устойчивое развитие горнодобывающего сектора в условиях растущих вызовов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильясов Ф. Н. Разум искусственный и естественный // Известия АН Туркменской ССР. Сер. обществ. наук. 1986. № 6. С. 46–54.
2. Морхат П. М. Совершенствование российского законодательства в части регулирования правового положения юнитов искусственного интеллекта в сфере права интеллектуальной собственности // Бизнес. Образование. Право. 2018. № 4 (45). С. 326–329. https://doi.org/10.25683/VOLBI.2018.45.425
3. Рыжкова Е. А., Рыжкова Е. К. Искусственный интеллект как элемент цифрового отношения // Юридические исследования. 2022. № 8. С. 1–11. https://doi.org/10.25136/2409-7136.2022.8.38546; https://elibrary.ru/EDPPGZ
4. Никулин Л. Ф., Великороссов В. В., Филин С. А., Ланчаков А. Б. Искусственный интеллект и трансформация менеджмента // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2020. Т. 16. № 4 (385). С. 600–612. https://doi.org/10.24891/ni.16.4.600; https://elibrary.ru/YUETZW
5. Самородов И. В., Ибрагимова З. Ф. Формирование стратегии развития предприятия // Финансы и учетная политика. 2023. Вып. 3 (31). С. 39–44.
6. Rio Tinto Smart Mining. URL: https://www.riotinto.com/about/innovation/smart-mining
7. Ленчук Е. Б. Технологическая модернизация как основа антисанкционной политики // Проблемы прогнозирования. 2023. № 4. С. 54–66.
8. Цхададзе Н. В., Кучковская Н. В., Бондаренко М. П., Фролова В. Б., Лазарев М. П. Разработка интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия на основе технологий индустрии 4.0 и циркулярной экономики // Горная промышленность. 2024. № S5. С. 12–20.
9. Фролова А. В., Копылова Л. Е. Цифровые двойники в высокотехнологичном производстве: новые инструменты цифровой экономики // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 1(224). С. 32–33.
10. Хвостов М. Ю., Иванов В. Б. Управление экологической деятельностью в условиях реализации концепции устойчивого развития // Экология. Риск. Безопасность: матер. Всеросс. науч.-практ. конф., Курган, 29–30 октября 2020 года. Курган: Курганский государственный университет, 2020. С. 188–189.
11. Сотников Д. В. Преимущества и недостатки цифровизации // Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки. 2021. № 16. С. 37–41.
12. Самарина В. П., Кузвисова Д. С., Старосельцев А. Н., Легкобыт А. С. К вопросу об оптимизации расходов на оборудование горно-обогатительного предприятия в условиях диверсификации поставок // Управленческий учет. 2024. № 5. С. 163–169.
13. Федотова А. В. Управление бизнес-процессами на обогатительном предприятии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 129–134.
14. Пикалов В. А., Соколовский А. В., Терешина М. А. Проблемы проектирования горнодобывающих предприятий в условиях высокой изменчивости внешней среды // Уголь. 2022. № 8 (1157). С. 100–105.
15. Творилова Т. В. Горно-обогатительные предприятия в России на пути к устойчивому развитию // Экономика сегодня: современное состояние и перспективы развития (Вектор-2021): сб. матер. Всеросс. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием, Москва, 25 мая 2021 года. Ч. 1. Москва: РГУ им. А. Н. Косыгина, 2021. С. 217–221.

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2025 года

UDC 658:622.7:004.9 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-155-163

Problems of digital transformation as a driver of innovative development of mining and processing enterprises

Aleksandr Borisovich FIRSOV

Samara State University of Economics, Samara, Russia

Abstract

The relevance of the work is due to the need to digitalize mining and processing enterprises in order to increase their efficiency and competitiveness. Despite the potential of AI and automation, the introduction of technology is constrained by high costs, a shortage of qualified personnel, and fragmented data. Investigating these issues will help accelerate the modernization of the industry.

The purpose of the work is to identify the key problems of digital transformation of mining and processing enterprises and identify ways to overcome them to ensure sustainable innovative development of the industry. The research is aimed at analyzing the technological, organizational and personnel barriers hindering the implementation of digital solutions, as well as at finding effective mechanisms to eliminate them, taking into account current trends in automation and the use of artificial intelligence.

The research methods included an analysis of current trends in the digitalization of the mining industry, an assessment of barriers to technology adoption (AI, IoT, Big Data) and their impact on production processes, as well as case studies of leading enterprises (for example, Rio Tinto and the Aktogay deposit).

The results of the work and the scope of application. The key problems of digital transformation have been identified: high costs, staff shortages, and data fragmentation. The prospects for the introduction of digital twins, predictive analytics and autonomous systems are shown. The results are useful for business leaders, engineers, and researchers involved in the modernization of the industry.

Conclusions. The digital transformation of mining and processing enterprises is a key factor in their innovative development in the context of globalization and stricter environmental requirements. The conducted research has confirmed that the introduction of artificial intelligence technologies, the industrial Internet of Things and digital twins can significantly increase the efficiency of extraction and processing of raw materials, optimize resource consumption and minimize anthropogenic impact on the environment. However, the successful implementation of these technologies requires an integrated approach that includes not only technical modernization, but also overcoming organizational barriers, adapting human resources, developing industry data standards, and creating flexible management systems.

Keywords**:** digital transformation, mining and processing enterprises, innovative development, automation, artificial intelligence, big data, the Internet of Things, resource efficiency, environmental sustainability, cybersecurity.

REFERENCES

1. Ilyasov F. N. 1986, Artificial and Natural Intelligence. *Izvestiya AN Turkmenskoy SSR. Seriya obshchestvennykh nauk* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Turkmen SSR, Social Sciences Series], no. 6, pp. 46–54. (*In Russ.*)
2. Morhat P. M. 2018, Improving Russian Legislation Regarding the Legal Status of Artificial Intelligence Units in the Sphere of Intellectual Property Law. *Biznes. Obrazovanie. Pravo* [Business. Education. Law], no. 4 (45), pp. 326–329. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25683/VOLBI.2018.45.425
3. Ryzhkova E. A., Ryzhkova E. K. 2022, Artificial Intelligence as an Element of Digital Relations. *Yuridicheskie issledovaniya* [Legal Studies], no. 8, pp. 1–11. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25136/2409-7136.2022.8.38546; https://elibrary.ru/EDPPGZ
4. Nikulin L. F., Velikorossov V. V., Filin S. A., Lanchakov A. B. 2020, Artificial Intelligence and Management Transformation. *Natsional'nye interesy: prioritety i bezopasnost'* [National Interests: Priorities and Security], vol. 16, no. 4 (385), pp. 600–612. (*In Russ.*) https://doi.org/10.24891/ni.16.4.600; https://elibrary.ru/YUETZW
5. Samorodov I. V., Ibragimova Z. F. 2023, Formation of an enterprise development strategy. *Finansy i uchetnaya politika* [Finance and accounting policy], issue 3 (31), pp. 39–44. (*In Russ.*)
6. Rio Tinto Smart Mining. URL: https://www.riotinto.com/about/innovation/smart-mining
7. Lenchuk E. B. 2023, Technological modernization as the basis of anti-sanctions policy // *Problemy prognozirovaniya* [Forecasting problems], no. 4, pp. 54–66. (*In Russ.*)
8. Tskhadadze N. V., Kuchkovskaya N. V., Bondarenko M. P., Frolova V. B., Lazarev M. P. 2024, Development of an intelligent mining lifecycle management system based on Industry 4.0 and circular economy technologies // *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. S5, pp. 12–20. (*In Russ.*)
9. Frolova, A. V, Kopylova L. E. 2020, Digital twins in high-tech production: new tools of the digital economy // *Uspekhi v himii i himicheskoj tekhnologii* [Successes in chemistry and chemical technology], vol. 34, no. 1(224), pp. 32–33. (*In Russ.*)
10. Khvostov M. Y., Ivanov V. B. 2020, Environmental management in the context of the implementation of the concept of sustainable development // Ecology. Risk. Safety: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Kurgan, October 29–30, 2020. Kurgan: Kurgan State University, pp. 188–189. (*In Russ.*)

✉firsovalexander99@gmail.ru
https://orcid.org/0009-0005-9703-4593

11. Sotnikov D. V. 2021, Advantages and disadvantages of digitalization // *Obrazovanie i nauka bez granic: social'no-gumanitarnye nauki* [Education and science without borders: social and humanitarian sciences], no. 16, pp. 37–41. (*In Russ.*)
12. Samarina V. P., Kuzvisova D. S., Staroseltsev A. N., Legkobyt A. S. 2024, On the issue of optimizing equipment costs for mining and processing enterprises in the context of supply diversification // *Upravlencheskij uchet* [Management accounting], no. 5, pp. 163–169. (*In Russ.*)
13. Fedotova A. V. 2024, Business process management at a processing plant // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], no. 9, pp. 129–134. (*In Russ.*)
14. Pikalov V. A., Sokolovsky A. V., Tereshina M. A. 2022, Problems of designing mining enterprises in conditions of high environmental variability // *Ugol'* [Coal], no. 8 (1157), pp. 100–105. (*In Russ.*)
15. Tvorilova T. V. 2021, Mining and processing enterprises in Russia on the way to sustainable development // Economics Today: current state and development Prospects (Vector-2021): proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation, Moscow, May 25, 2021. Part 1. Moscow: A. N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), pp. 217–221. (*In Russ.*)

The article was received on April 29, 2025