

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Стёпочкин Е.А., студент

Научный руководитель Морзак Г. И.

Белорусский национальный технический университет Беларусь

В статье приведены данные интеграции нейросетевых алгоритмов с применением цифровых двойников в георазведке на различных этапах освоения месторождений. Такой подход применяется при исследовании технологического процесса добычи полезных ископаемых для цифровой модернизации отрасли. Показаны методы и алгоритмы искусственного интеллекта, направленные на оптимизацию ресурсосбережения и минимизацию производственных потерь, и упрощению логистики. Применение технологий ИИ позволит обеспечить единую цепочку от георазведки к логистике и экологии, минимизируя риски и потери.

Ключевые слова: промышленная революция, горная промышленность, технологии искусственного интеллекта, технология цифровых двойников.

Промышленная революция предполагает внедрение искусственного интеллекта, роботизацию, нейротехнологий в технологические процессы. Ключевым этапом развития четвертой промышленной революции («Индустрия 4.0») выступает интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения в технологические процессы с целью роста операционной эффективности предприятий. Основные принципы четвертой промышленной революции представлены на рисунке 1. Применение интеллектуальных систем позволит перейти от реактивного (реагирование на проблемы, сбои или изменения после их возникновения, а не на их предотвращение) управления к предиктивному моделированию (использование накопленных данных для прогнозирования будущих результатов), что критически важно для минимизации потерь при добыче и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду [1].

Наиболее используемой интеллектуальной технологией в геологоразведке является технология цифровых двойников (Digital Twins). Цифровой двойник— это динамическая программная модель физического объекта, которая в режиме реального времени обменивается данными со своим реальным прототипом [2]. В добыче ресурсов эта технология применяется в трех ключевых аспектах: цифровой двойник месторождения, двойники обогатительных фабрик и перерабатывающих комплексов, сценарное моделирование «Что, если? В отличие от статичных геологических карт, цифровой двойник постоянно обновляется на основе данных, поступающих в процессе бурения и датчиков на технике. ИИ анализирует данные с коронок

буровых установок (сопротивление породы, скорость проходки) и мгновенно корректирует границы рудного тела в виртуальной модели. Это позволяет избежать «забалансовой» добычи, когда ценная руда остается в земле из-за неверных расчетов, или, наоборот, когда в переработку попадает слишком много пустой породы. Инженеры могут прогнать симуляцию добычи на 5 лет вперед за несколько минут, выбирая наиболее рациональный порядок отработки блоков. На основе этой модели данные передаются в последующие этапы, такие как БВР (бурение скважин + взрыв) и логистика, обеспечивая непрерывную оптимизацию [2].



Рисунок 1-Основные принципы четвертой промышленной революции

Самые большие потери ресурсов происходят на этапе переработки (извлечения полезного компонента). Цифровой двойник фабрики позволяет «видеть» процессы, скрытые внутри огромных мельниц и флотационных машин. ИИ на базе двойника подбирает идеальное соотношение реагентов, воды и скорости вращения оборудования в зависимости от химического состава поступающей руды. Повышение коэффициента извлечения даже на 0,5–1% на предприятиях приносит миллиардную прибыль и экономит тысячи тонн сырья, которое раньше уходило в «хвосты» (отходы).

Главное преимущество цифрового двойника — возможность проводить рискованные эксперименты в виртуальной среде без остановки реального производства. Применение цифровых двойников напрямую влияет на рациональное природопользование. К основным экологическим и экономическим эффектам применения относятся:

- снижение энергопотребления (оптимизация работы насосов и вентиляционных систем шахт снижает потребление электричества на 15–20%);
- повышение безопасности (двойник предсказывает обрушение бортов карьера или кровли шахты за несколько часов до события).

Таким образом, георазведка с цифровыми двойниками закладывает основу для рационального использования ресурсов на всех этапах [3].

Для оптимизации буровзрывных работ (БВР) широко применяются MWD-технологии, компьютерное зрение для оценки качества дробления и цифровое моделирование взрывной волны. Традиционный подход к БВР часто опирается на усредненные показатели крепости породы. ИИ позволяет перейти к персонализированному взрыву для каждого конкретного участка блока. Процесс оптимизации начинается еще до закладки взрывчатки. Современные буровые станки оснащаются системой измерения в процессе бурения MWD (Measurement While Drilling). Датчики фиксируют скорость проходки, давление на забой, крутящий момент и вибрацию (рисунок 2). Затем Нейросеть в реальном времени анализирует эти данные, создавая уточненную карту прочности породы. Если бур встречает «мягкий» участок или пустоту, система мгновенно корректирует бурение. В итоге исключается бурение лишних скважин и обеспечивается идеальная геометрия сетки, что является фундаментом для качественного взрыва.

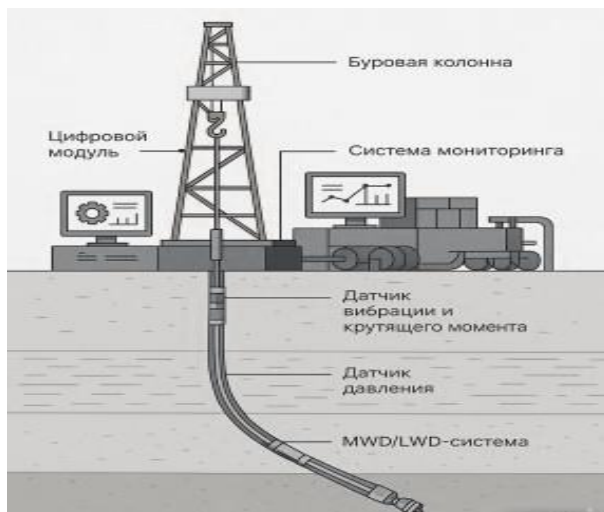


Рисунок 2 – Современная интеллектуальная буровая установка

На помощь оценки качества взрыва приходит компьютерное зрение. Камеры, установленные на экскаваторах и дробилках, делают тысячи снимков

взорванной горной массы. Алгоритмы сегментации ИИ определяют размер каждого куска породы (гранулометрический состав). Если система видит слишком много крупных фракций, она автоматически передает сигнал в отдел БВР. ИИ корректирует параметры для следующего взрыва. Полученные данные анализируются, и информация о размере кусков позволяет мельницам на обогатительной фабрике подстроить режим работы, экономя до 10% электроэнергии. ИИ позволяет моделировать разлет породы и сейсмическое воздействие до нажатия кнопки «Пуск». Используя данные о трещиноватости массива, ИИ предсказывает вектор движения породы. Это позволяет формировать «развал» (кучу взорванной руды) так, чтобы экскаватору было максимально удобно и быстро её грузить. Вблизи населенных пунктов или охраняемых объектов ИИ рассчитывает интервалы замедления между взрывами скважин, чтобы звуковая волна и вибрация гасили друг друга.

К основным экологическим и экономическим эффектам применения технологий ИИ при БВР относятся [4]:

- математически эффективность БВР можно выразить через минимизацию удельного расхода энергии на дробление.

- ИИ находит ту «золотую середину», когда чуть большие затраты на точный взрыв приводят к колоссальной экономии на самых энергозатратных этапах — дроблении и измельчении.

Транспортировка горной массы — самая затратная статья расходов в открытой добыче (до 40–60% от себестоимости). Использование ИИ для управления парком техники позволяет превратить хаотичное движение самосвалов в идеально настроенный «конвейер», опираясь на модели из цифрового двойника георазведки. Это создает логический переход от планирования к исполнению [5]. Для организации интеллектуальной логистики применяют беспилотные карьерные самосвалы (AHS — Autonomous Haulage Systems), роевой интеллект в диспетчеризации, удаленное управление и безопасность.

В отличие от обычного автомобиля, автономный самосвал весом в сотни тонн управляется нейросетью, которая анализирует данные с лидаров, радаров и высокоточного GPS (RTK). ИИ рассчитывает оптимальный скоростной режим так, чтобы избегать лишних торможений и ускорений. Это снижает расход топлива на 12–15%. Крупногабаритные шины — один из самых дорогих расходных материалов (стоимость одной шины может достигать нескольких миллионов рублей). ИИ исключает резкие повороты и наезды на острые камни, что продлевает жизнь колеса на 20–25%. Роботы не нуждаются в пересменках, обедах и не теряют концентрацию ночью. Это повышает общую производительность парка на 15–20%.

Ключевая проблема любого карьера — очереди у экскаваторов. Если один экскаватор сломался, традиционная система часто не успевает

оперативно перенаправить поток машин. В свою же очередь ИИ-диспетчер в реальном времени решает задачу коммивояжера для парка техники. Система видит, где образовался затор, и перераспределяет самосвалы между точками погрузки и разгрузки. Благодаря алгоритмам, ИИ минимизируют время работы двигателя «впустую», что напрямую снижает выбросы парниковых газов в атмосферу. Не вся техника может быть полностью автономной. Для сложных участков используются системы дистанционного управления. Оператор находится в офисе за сотни километров от разреза, управляя бульдозером через VR-шлем и джойстики. Это исключает риск травматизма и профессиональных заболеваний (вибрация, пыль). Даже при ручном управлении ИИ страхует человека, блокируя опасные маневры или предупреждая о сближении с другими объектами с помощью системы CAS (Collision Avoidance System). Предиктивные модели из двойника усиливают безопасность.

Интеграция ИИ в природоохранную деятельность позволяет перейти от ликвидации последствий экологических инцидентов к их предотвращению. Рациональное природопользование рассматривается как минимизация вмешательства в экосистему при сохранении темпов добычи, с использованием данных из цифрового двойника георазведки для глобального мониторинга. ИИ создает единую логическую цепочку от моделирования месторождения к оптимизации БВР, логистике и экологии. Это не только минимизирует потери и риски, но и способствует устойчивому развитию

Литература:

1. Артемов И. В., Носырев М. Б. Технология цифровых двойников и ее применение в горнодобывающей промышленности // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №5. С. 38–43.
2. Гурбанмырадов М. Цифровой двойник горного предприятия //Международный научный журнал «Символ науки», 2025. -№1–1–2.- С.49-51.
3. Бурмистров К.В., Багдасарян М. А., Трегубов А.А., Симонова Д. М. Применение цифровых двойников в горнодобывающей отрасли// Недропользование и транспортные системы. 2025. Т. 15. №1. С.38–48.
4. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Иванов А. А. Цифровые двойники в горном машиностроении, как инструмент повышения эффективности эксплуатации горных машин [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://www.litres.ru/book/a-ivanov-33213274/cifrovye-dvoyniki-v-gornom-mashinostroenii-kak-instrumen-71261554/>- Дата доступа: 20.03.2026.
5. Клебанов А.Ф., Еремкин И.В., Габусу П.А. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами. Горная промышленность, 2025, №4, с. 61–70.