

УДК 622.271:004.8:330.45

АНАЛИЗ БАРЬЕРОВ И ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Фрицлер В.А., студент гр. ЭБбтс-241, II курс
Научный руководитель: Жиронкин С.А., д.э.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Тема оптимизации календарных планов открытых горных работ с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) актуальна благодаря развитию цифровых технологий в горнодобывающей отрасли. ИИ позволяет прогнозировать производственные результаты, рационально использовать ресурсы, повышать экономическую эффективность и улучшать безопасность труда. Можно привести примеры реализации систем оптимизации календарных планов открытых горных работ с использованием ИИ [1].

Во-первых, система «Горное планирование» на предприятиях УГМК. Интегрируется с геоинформационными системами и моделями месторождений, позволяет в режиме «живого» времени строить адаптивные графики горных работ. Сокращение отклонений по графикам более чем на 20% достигнуто благодаря автоматизации анализа сценариев и встроенным рекомендациям по корректировке планов в случае изменения условий.

Во-вторых, ИИ-система, рекомендуемая параметры бурения и взрывов, внедрённая на карьерах «Северстали». Используется в связке с цифровыми моделями карьера и данными с датчиков в режиме реального времени, позволяет учитывать неоднородность массива и снижать переразмол. В результате повысилось качество дроблёного материала, а затраты на передробление сократились на 10–15%.

Переход горнодобывающей отрасли к цифровым методам управления породил высокий интерес к применению искусственного интеллекта (ИИ) в задачах долгосрочного и краткосрочного планирования. Традиционные подходы, основанные на ручном переборе вариантов или использовании детерминированных линейных моделей, зачастую не способны учесть всю совокупность переменных, влияющих на экономику проекта. Количество комбинаций последовательности отработки блоков даже для месторождения средней сложности исчисляется астрономическими величинами. Человек физически не способен перебрать их все за разумное время. Алгоритмы ИИ, в теории, позволяют находить неочевидные закономерности в исторических данных. Они могут предлагать последовательности отработки блоков, максимизирующие чистый дисконтированный доход. Однако между

математической моделью и реальной выемкой полезного ископаемого лежит пропасть производственных рисков.

Если в задачах распознавания образов или прогнозного обслуживания оборудования ошибки алгоритма могут быть исправлены следующей итерацией, то в планировании горных работ ситуация иная. Неверное решение, заложенное в график на год вперед, может привести к необратимым экономическим потерям. Возможны нарушения технологической связности процессов. Например, экскаватор может оказаться на участке, куда еще не подведена дорога, или фабрика останется без руды нужного качества из-за ошибки в последовательности добычи. В связи с этим критический анализ проблем внедрения таких систем становится не менее важным, чем описание их преимуществ.

Фундаментальной сложностью при использовании ИИ для планирования является качество исходной информации. Любая оптимизационная модель работает по принципу «мусор на входе — мусор на выходе». В горном деле основным источником неопределенности остается геологическая модель месторождения. Даже при плотной сети разведочных скважин существует вероятность расхождения между прогнозируемым содержанием полезного компонента в блоке и фактическими данными. Это особенно заметно при взрывной подготовке или погрузке. Модель всегда остается интерполяцией, а не точной копией недр.

Алгоритмы машинного обучения, обученные на исторических данных, могут некорректно экстраполировать тенденции на новые горизонты. Там горно-геологические условия часто отличаются от уже отработанных [2,3]. Ситуация усугубляется региональной спецификой. Например, при отработке угольных разрезов в Кузбассе геологи сталкиваются со сложной тектоникой и изменчивой мощностью пластов [4]. Алгоритм, обученный на данных более стабильных месторождений, может не учесть локальные разломы. Это приведет к тому, что техника выйдет на участок, где уголь отсутствует или сильно загрязнен породой. В условиях Кузбасса, где пласты могут иметь сложную структуру нарушенности, такая ошибка критична.

Многие предприятия не ведут систематизированный архив производственных показателей в цифровом виде. Данные могут быть разрознены. Они часто содержат ошибки ручного ввода или являются неполными. Попытка оптимизировать план на основе такой информации создает иллюзию точности. Инженер-планировщик получает график, который математически идеален. Но физически он нереализуем из-за неучтенных зон тектонических нарушений. Либо причиной становятся изменения гидрогеологических условий, которые алгоритм не смог интерпретировать корректно. Мы видим, что проблема не в алгоритме, а в фундаменте, на котором он строится.

Второй существенный барьер касается прозрачности принимаемых решений. Многие современные методы оптимизации функционируют как «черный ящик». Речь идет о сложных архитектурах, таких как метод

муравьиной колонии (Ant Colony Optimization) или ансамбли деревьев решений (Random Forest). Система выдает рекомендуемую последовательность отработки уступов. Но она не всегда может обосновать логику своего выбора на понятном для человека языке.

Для главного инженера или директора карьера важно понимать причинно-следственные связи. Почему план предлагает сначала вскрыть именно этот участок, а не соседний? Если решение противоречит профессиональной интуиции, основанной на многолетнем опыте, возникает естественное сопротивление. Отсутствие интерпретируемости затрудняет верификацию плана. В традиционном планировании специалист может проследить цепочку расчетов. В случае с ИИ проверка сводится к сравнению результата с эталоном. Часто такого эталона не существует для уникальных месторождений.

Кроме того, существует риск переобучения модели. Алгоритм может идеально оптимизировать план под конкретные исторические условия прошлого периода. Но он окажется неэффективным при изменении рыночной конъюнктуры. Например, при резком падении цен на сырье или росте тарифов на энергоносители. Жесткость математической модели часто не совпадает с гибкостью, требуемой в реальном производстве. Модели глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) требуют огромного количества эпизодов для обучения. В реальности у нас нет возможности проводить тысячи «виртуальных» лет добычи без рисков. Ошибка в процессе обучения может стоить предприятию миллионов рублей.

Третья группа проблем связана с интеграцией оптимизационных инструментов в живой производственный процесс. Календарный план не существует в вакууме. Он должен быть согласован с возможностями горнотранспортного оборудования [5]. Необходимо учитывать ремонтные окна, наличие персонала и логистические ограничения. Часто системы планирования на базе ИИ работают обособленно от систем оперативного управления (FMS) и диспетчеризации.

Возникает разрыв между стратегическим планом, составленным алгоритмом, и тактическими решениями. Диспетчер принимает их в смену. Реальность карьера динамична. Внезапный отказ экскаватора требует мгновенной реакции. Изменение погодных условий или задержка поставки ГСМ тоже влияют на график. Внеплановый ремонт дороги может заблокировать ключевой участок. Большинство существующих алгоритмов оптимизации являются статичными. Они рассчитывают план на длительный период. При этом они плохо адаптируются к быстрым изменениям.

Попытка пересчитывать план каждый раз при возникновении сбоя требует колоссальных вычислительных ресурсов. Времени у производителей на это нет. В результате персонал игнорирует рекомендации системы. Они возвращаются к ручному управлению. Это обесценивает внедрение технологии. Необходимы решения, которые работают в режиме онлайн. Но вычислительная сложность таких задач пока остается

высоким барьером. Мы сталкиваемся с конфликтом между идеальной математикой и хаотичной реальностью.

Нельзя игнорировать и социально-психологический аспект внедрения. Автоматизация планирования воспринимается частью инженерного состава как угроза квалификации. Возникает вопрос ответственности. Если план, составленный искусственным интеллектом, приведет к срыву производственной программы, кто будет нести ответственность? Разработчик алгоритма, внедренец или главный инженер, утвердивший рекомендацию?

Пока правовые и корпоративные регламенты не адаптированы под такие ситуации, руководители предпочитают перестраховываться. Они корректируют планы вручную. Это нивелирует преимущества оптимизации. Кроме того, требуется повышение цифровой грамотности персонала. Инженеры должны не просто пользоваться программой. Они должны понимать принципы ее работы. Это нужно, чтобы критически оценивать выдаваемые результаты, а не слепо им доверять. Без этого доверие к системе не будет достигнуто. Культура предприятия должна измениться вместе с технологиями.

Несмотря на перечисленные проблемы, отказ от использования элементов ИИ в планировании представляется нецелесообразным. Слишком высок потенциал повышения эффективности. Наиболее реалистичным сценарием на ближайшую перспективу видится внедрение гибридных систем. В такой модели искусственный интеллект не заменяет планировщика. Он выступает в роли интеллектуального ассистента.

Алгоритм может генерировать несколько сценариев развития работ. Для каждого из них дается оценка рисков и экономических показателей. Окончательный выбор и адаптация плана под текущие реалии остаются за человеком. Это позволяет совместить вычислительную мощь машины с гибкостью и интуицией специалиста. Также перспективным направлением является использование методов имитационного моделирования. Они позволяют проверять планы, созданные ИИ, перед их утверждением. Это создает дополнительный контур верификации.

Важным шагом должно стать развитие стандартов обмена данными. Необходимо наладить связь между геологическими, маркшейдерскими и производственными системами. Единое информационное пространство позволит алгоритмам получать актуальные данные в реальном времени. Это снизит влияние фактора неопределенности. Мы видим путь не в замене человека, а в усилении его возможностей.

Обобщая вышесказанное, можно констатировать, что применение алгоритмов искусственного интеллекта для оптимизации календарных планов открытых горных работ является перспективным, но технологически незрелым направлением. Основные препятствия лежат не столько в плоскости вычислительной мощности. Они касаются качества данных, интерпретируемости моделей и адаптивности к реальной производственной среде. Для успешного внедрения необходимо переходить от создания

изолированных оптимизаторов к разработке гибридных систем. ИИ должен выступать в роли помощника, предлагающего варианты. Окончательное решение остается за человеком.

Требуется разработка стандартов верификации таких систем. Нужны механизмы обратной связи, позволяющие алгоритму обучаться на ошибках реального производства. Только при условии преодоления барьера недоверия и обеспечения прозрачности решений искусственный интеллект сможет стать реальным инструментом повышения эффективности. Иначе он останется дорогостоящим экспериментом. Отрасль стоит на пороге изменений, но шаг должен быть осторожным и взвешенным.

Список литературы:

1. Открытые горные работы и буровзрывные работы: цифровые технологии и инновации. URL: <https://blog.seymartec.ru/2025/06/02/open-pit-mining-and-blasting-operations/> (Дата обращения: 01.04.2026).
2. Кадырова Г.М., Красюкова Н.Л., Рождественская И.А., Токмурзин Т.М., Воронова Е.И. Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация Russian Mining Industry №1 / 2025 p. 137-146
3. Пардаев Ф. Ш., Истамов З. В., Аллаяров Р. М. Использование математического моделирования и искусственного интеллекта для оптимизации работ на открытых горных разработках // Universum: технические науки. 2025. №6 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-matematicheskogo-modelirovaniya-i-iskusstvennogo-intellekta-dlya-optimizatsii-rabot-na-otkrytyh-gornyh-razrabotkah> (дата обращения: 21.02.2026).
4. Tyuleneva, T. A. Problems and Prospects of Regional Mining Industry Digitalization / T. A. Tyuleneva // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 04019. – DOI 10.1051/e3sconf/202017404019. – EDN ELBBWK.
5. Герике, Б. Л. Внедрение цифровых технологий в области технической диагностики, обслуживания и ремонта горных машин и оборудования / Б. Л. Герике, А. Е. Сушко, П. Б. Герике // Техника и технология горного дела. – 2018. – № 3(3). – С. 19-29. – DOI 10.26730/2618-7434-2018-3-19-28. – EDN YWCEGT.