

Интеграция систем искусственного интеллекта в автоматизированное управление буровыми процессами: технологический трансфер из нефтегазовой отрасли в угольную промышленность

И.В. Самарин ✉

Российский государственный университет нефти и газа имени Губкина, г. Москва, Российская Федерация

✉ ivs@gubkin.ru

Резюме: Угольная промышленность находится на этапе критической необходимости внедрения передовых технологий автоматизации для обеспечения конкурентоспособности и безопасности горных работ. В исследовании анализируются возможности адаптации систем автоматизированного управления буровыми процессами, разработанных для нефтегазовой отрасли, к специфике угледобычи. Глобальный рынок автоматизации буровых работ демонстрирует устойчивый рост с объемом 4,66 млрд долл. в 2024 г. и прогнозируемым расширением до 9,19 млрд долл. к 2034 г. при среднегодовом темпе роста 7,32%. Параллельно рынок искусственного интеллекта в нефтегазовом секторе увеличился с 5,305 млрд долл. в 2024 г. с прогнозом достижения 15,010 млрд долл. к 2029 г. при темпе роста 23,12% ежегодно. Внедрение систем машинного обучения в буровое оборудование нефтедобывающих компаний обеспечило сокращение незапланированных простоев на 20%, снижение эксплуатационных расходов на 10–15% и повышение скорости бурения на 26–30% в условиях сланцевых месторождений. Критическим вкладом исследования является разработка методологии оценки технологической готовности угольных предприятий к интеграции автоматизированных систем через сравнительный анализ геомеханических параметров бурения в различных геологических средах. Установлено, что коэффициент корреляции между параметрами автоматизации нефтегазового бурения и угледобычи составляет 0,78 для систем телеметрии, 0,83 для SCADA-платформ и 0,62 для алгоритмов машинного обучения, что определяет дифференцированную стратегию технологического трансфера. Китайские угольные предприятия, интегрировавшие автоматизированные буровые системы с использованием искусственного интеллекта, достигли 40%-ной нормы прибыли при снижении энергопотребления на 2 млн кВт·ч в год на одном предприятии. Выявлена критическая зависимость эффективности внедрения от масштаба операций: предприятия с годовым объемом буровых работ менее 80 тыс. м демонстрируют период окупаемости более 8 лет, тогда как при объемах свыше 150 тыс. м период сокращается до 3,8–4,5 лет. Разработана трехуровневая модель барьеров технологического трансфера с квантификацией критичности: киберзащита промышленных систем управления (индекс 4,9), дефицит данных для обучения алгоритмов (4,7) и нехватка квалифицированного персонала (4,5) по пятибалльной шкале.

Ключевые слова: автоматизация буровых процессов, искусственный интеллект в горном деле, цифровые двойники буровых установок, предиктивная аналитика, SCADA-системы, угольная промышленность, технологический трансфер

Для цитирования: Самарин И.В. Интеграция систем искусственного интеллекта в автоматизированное управление буровыми процессами: технологический трансфер из нефтегазовой отрасли в угольную промышленность. *Горная промышленность*. 2026;(2):152–160. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-152-160>

Integration of Artificial Intelligence solutions into automated control of the drilling processes: technology transfer from the oil and gas industry to the coal industry

I.V. Samarin ✉

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

✉ ivs@gubkin.ru

Abstract: The coal industry is at its critical stage where implementation of advanced automation technologies becomes essential to ensure the competitiveness and safety of mining operations. This study analyzes the potential for adapting automated systems to control drilling processes that were originally developed for the oil and gas industry to the specific needs of coal mining. The global market for drilling automation is showing steady growth, with the volume of \$4.66 billion in 2024 and a projected expansion to \$9.19 billion by 2034, at an average annual growth rate of 7.32%. At the same time, the AI market in the oil and gas sector has grown from \$5.305 billion in 2024, with a forecast to reach \$15.010 billion by 2029, at an annual growth rate of 23.12%.

Implementation of the machine learning technologies in oil companies' drilling equipment has reduced unplanned downtime by 20%, lowered the operating costs by 10–15%, and increased the drilling speed by 26–30% in shale plays. A critical contribution of this research is the development of a methodology to assess the technological readiness of coal mining operations for integration of automated systems through a comparative analysis of geomechanical drilling parameters in various geological environments. It has been established that the correlation coefficient between the automation parameters in the oil and gas drilling and in coal mining is 0.78 for the Measurement While Drilling (MWD) systems, 0.83 for the SCADA platforms, and 0.62 for the machine learning algorithms, which determines a differentiated strategy for the technology transfer. The Chinese coal companies that integrated automated AI-based drilling systems have achieved a 40% profit margin while reducing their energy consumption by 2 million kWh per year at a single operation. The study identified a critical dependence of the implementation efficiency on the scale of operations, i.e. companies with the annual drilling volume of less than 80,000 m demonstrate a payback period of over 8 years, whereas for the volumes exceeding 150,000 m, this period is reduced to 3.8–4.5 years. A three-level model of barriers to the technology transfer has been developed with its criticality assessed using a five-point scale: cybersecurity of industrial control systems (index 4.9), lack of data to train the algorithms (4.7), and shortage of qualified personnel (4.5).

Keywords: drilling process automation, artificial intelligence in mining, digital twins of drilling rigs, predictive analytics, SCADA systems, coal industry, technology transfer

For citation: Samarin I.V. Integration of Artificial Intelligence solutions into automated control of the drilling processes: technology transfer from the oil and gas industry to the coal industry. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):152–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-152-160>

Введение

Современная угольная промышленность испытывает возрастающее давление со стороны требований повышения производительности, обеспечения безопасности труда и снижения операционных издержек в условиях истощения легкодоступных запасов и усложнения горно-геологических условий разработки. Традиционные подходы к организации буровых работ, основанные преимущественно на ручном управлении и периодическом техническом обслуживании оборудования, демонстрируют критические ограничения в части оперативности реагирования на изменения забойных условий, точности позиционирования буровых инструментов и прогнозирования технических отказов. Параллельно нефтегазовая отрасль осуществила масштабную цифровую трансформацию буровых операций, внедрив системы автоматизированного управления с интеграцией искусственного интеллекта, машинного обучения и промышленного интернета вещей, что обеспечило качественный скачок в производительности и безопасности¹.

Глобальный рынок автоматизации нефтегазового бурения достиг 44 млрд долл. в 2023 г. с прогнозируемым расширением до 67,53 млрд долл. к 2030 г., демонстрируя среднегодовые темпы роста 6,31%². Одновременно рынок применения искусственного интеллекта в нефтегазовом секторе увеличивается от 5,305 млрд долл. в 2024 г. до прогнозируемых 15,010 млрд долл. к 2029 г. при темпе роста 23,12% ежегодно³.

Научная проблематика технологического трансфера автоматизированных систем между отраслями с различными геолого-технологическими характеристиками остается недостаточно разработанной в академической литературе, несмотря на очевидный потенциал ускорения инновационного развития угольной промышленности. Существующие исследования фокусируются преимущественно

на описании отдельных технологических решений без систематического анализа условий их применимости в альтернативных отраслевых контекстах. Критический пробел заключается в отсутствии методологии оценки технологической совместимости автоматизированных систем бурения с учетом специфики геомеханических параметров различных геологических формаций, что препятствует обоснованным инвестиционным решениям угольных компаний [1]. Вторым существенным пробелом является недостаточность эмпирических данных о количественных эффектах внедрения систем искусственного интеллекта в буровые процессы угледобычи, что ограничивает возможности бенчмаркинга и формирования реалистичных ожиданий отрасли. Третья лагуна касается барьеров институционального характера, включая регуляторную неопределенность применения автономных систем в подземных условиях, проблемы киберзащиты критической инфраструктуры и дефицит квалифицированного персонала для эксплуатации интеллектуальных систем управления. Четвертый нерешенный вопрос связан с экономическими моделями обоснования инвестиций в автоматизацию с учетом масштабных эффектов, чувствительности к волатильности цен на энергоносители и временных горизонтов окупаемости капитальных затрат⁴.

Исследования подтверждают фундаментальное сходство физико-механических процессов бурения в различных геологических формациях, что создает объективные предпосылки для адаптации систем автоматизации, однако специфика угольных месторождений требует модификации алгоритмов управления с учетом повышенной газоносности, склонности пород к самовозгоранию и необходимости соблюдения строгих требований взрывобезопасности⁵. Ключевые технологические компоненты современных автоматизированных буровых комплексов включают распределенные системы управления на базе программируемых логических контроллеров, SCADA-платформы для диспетчеризации и сбора данных, сенсорные сети промышленного интернета вещей для мониторинга

¹ Drilling Automation Market Size & Share Analysis Report 2034. Market Research Future. 2024. Available at: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/drilling-automation-market-35024> (accessed: 03.12.2025).

² Global Oil & Gas Drilling Automation Market Growth, 2024–2030. Frost & Sullivan. 2024. Available at: <https://www.marketresearch.com/Frost-Sullivan-v383/Oil-Gas-Drilling-Automation-Global-37622521/#toc> (accessed: 03.12.2025).

³ Artificial Intelligence (AI) in Oil and Gas Market Research 2024–2029. Research and Markets. 2024. Available at: <https://www.marketresearch.com/Knowledge-Sourcing-Intelligence-LLP-v4221/Artificial-Intelligence-AI-Oil-Gas-38550292/#toc> (accessed: 03.12.2025).

⁴ Oil and Gas Drilling Automation Industry Research Report 2024–2030. Research and Markets. 2024. Available at: <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/11/27/2988291/28124/en/> (accessed: 03.12.2025).

⁵ Robotic Drilling Market Size & Share | Industry Report, 2030. Grand View Research. 2024. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/robotic-drilling-market-report> (accessed: 03.12.2025).

параметров бурения в реальном времени, алгоритмы машинного обучения для предиктивной аналитики отказов оборудования и цифровые двойники для виртуального моделирования процессов.

Критический анализ технологической архитектуры автоматизированных буровых систем нефтегазового сектора выявляет модульную структуру, допускающую поэтапную интеграцию компонентов без полной замены существующего оборудования, что снижает капитальные затраты на модернизацию угольных предприятий. Робототехнические буровые установки продемонстрировали 7%-ный среднегодовой рост рынка с объемом 981,9 млн долл. в 2024 г., обеспечивая повышение точности, скорости и снижение операционных издержек⁶.

Системы искусственного интеллекта трансформируют управление буровыми процессами через автоматизацию принятия решений на основе анализа больших данных, генерируемых сенсорными сетями в объемах, превышающих 10 Тбайт (ТБ) в сутки на одну скважину. Алгоритмы машинного обучения обеспечивают автоматическую коррекцию параметров бурения для оптимизации скорости проходки, прогнозирование осложнений забоя и предупреждение критических отказов оборудования с заблаговременностью до одного часа [2].

Американские операторы сланцевых месторождений, внедрившие автоматизированные буровые системы с искусственным интеллектом, сократили количество команд операторов на 5000 единиц на скважину при повышении скорости бурения минимум на 30% [3]. Ведущие сервисные компании реализовали полностью автоматизированные буровые платформы, интегрирующие управление буровыми растворами, установкой обсадных колонн и оптимизацией траектории ствола, обеспечив 60%-ное увеличение скорости проходки на бразильских морских месторождениях⁷. Технологии цифровых двойников создают виртуальные реплики физических буровых активов для симуляции сценариев работы, оптимизации параметров и прогнозирования поведения оборудования, что радикально трансформирует подходы к планированию и управлению буровыми операциями⁸. Рынок цифровых двойников в нефтегазовом секторе прогнозируется к расширению с 138,69 млн долл. в 2024 г. до 911,72 млн долл. к 2032 г. при среднегодовом темпе роста 26,54% [4].

Материалы и методы

Методология комбинирует количественный анализ производственных данных с качественной оценкой технологической применимости. Разработан индекс технологической совместимости автоматизированных систем бурения, рассчитываемый как взвешенная сумма коэффициентов корреляции между ключевыми параметрами процесса⁹ [5]. Индекс включает пять измерений: физико-механические свойства пород (крепость, трещиноватость, абразивность);

режимные параметры бурения (нагрузки, скорости, подача инструмента); требования к точности позиционирования; условия эксплуатации (температура, запыленность, взрывоопасность); структура производственных процессов (циклы, обслуживание, квалификация персонала).

Эмпирическая база: операционные данные автоматизированных буровых установок нефтегазового сектора (январь 2022 г. – декабрь 2024 г., Северная Америка, Европа, АТР, Ближний Восток) и интеллектуальных угольных шахт провинций Шаньси и Внутренняя Монголия (Китай). Критерии отбора нефтегазовых объектов: верифицированные показатели в публичной отчетности, непрерывная эксплуатация автоматизации ≥ 18 месяцев, документированные геологические параметры. Для угольных предприятий: функционирование систем ИИ, публичная доступность данных, техническая документация. К январю 2024 г. в провинции Шаньси функционировали 118 интеллектуальных шахт и 1491 автоматизированная площадка (>70% глобальных внедрений ИИ в угольной отрасли).

Технологический аудит через декомпозицию архитектуры: сенсорные сети IoT (плотность датчиков для мониторинга температуры, вибрации, давления, метана с частотой ≥ 100 Гц); распределенные системы управления (ПЛК с циклом обработки <10 мс); SCADA-платформы (обработка телеметрии от 10 000 ед. оборудования); алгоритмы машинного обучения (нейросети, деревья решений, SVM); цифровые двойники (симуляция ≥ 1000 вариантов траектории/ч).

Оценка производительности: сравнительный анализ KPI (скорость проходки, коэффициент готовности, частота остановок, энергозатраты, производительность труда). Статистическая обработка: регрессионный анализ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$, где Y – производительность, $X_1 \dots X_n$ – факторы автоматизации, $\beta_0 \dots \beta_n$ – коэффициенты, ε – ошибка. Значимость по t -критерию Стьюдента ($\alpha = 0,05$), качество модели – R^2 . Кластерный анализ методом k -средних с евклидовой метрикой. Корреляционный анализ: коэффициенты Пирсона для количественных переменных, Спирмена для ранговых оценок.

Моделирование трансфера через симуляцию в типовых условиях угольных месторождений. Параметры угольных пластов: крепость по Протодяконову 1–3 (уголь) и 4–8 (вмещающие породы), трещиноватость 8–15/м, газоносность 5–25 м³ CH₄/т, инкубационный период самовозгорания 2–6 мес. Верификация моделей: сопоставление с данными пилотных внедрений, средняя абсолютная процентная ошибка $\leq 8\%$. Экономическая оценка: NPV проектов модернизации (капитальные затраты, операционные издержки, экономия от роста производительности и снижения аварийности). Период дисконтирования 7 лет при ставке 8% годовых.

Результаты

Компаративный анализ технологических решений автоматизации буровых процессов выявил критическую зависимость эффективности внедрения от индекса технологической совместимости геологических условий, рассчитанного для нефтегазового и угольного секторов. Среднее значение индекса составило 0,74 по шкале от 0 до 1, что указывает на высокий потенциал трансфера технологий при необходимости адаптации компонентов систем искусственного интеллекта. Декомпозиция индекса по функциональным измерениям показала: сходство физико-механических свойств горных пород 0,68, совместимость режимных параметров бурения 0,83, идентичность требо-

6 Oil & Gas Operations with Predictive Automation: Use Cases in Drilling Management. IoT for All. 2024. Available at: <https://www.iotforall.com/oil-gas-operations-with-predictive-automation-use-cases-in-drilling-management> (accessed: 03.12.2025).

7 Revolutionizing Oil & Gas: The Impact of Automation on Drilling Efficiency and Safety. Oil Gas Leads. 2024. Available at: <https://oilgasleads.com/revolutionizing-oil-gas-the-impact-of-automation-on-drilling-efficiency-and-safety/> (accessed: 03.12.2025).

8 Digital Twin for the Oil & Gas Industry. IBM Think. 2025. Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin-for-oil-gas> (accessed: 03.12.2025).

9 China's AI Revolution Reshapes Coal Industry Profitability. International Coalition for Sustainable Carbon. 11 April 2025. Available at: <https://www.sustainable-carbon.org/chinas-ai-revolution-reshapes-coal-industry-profitability/> (accessed: 03.12.2025); SCADA Oil & Gas Market Trends in Upstream and Downstream Operations 2025–2032. Manchester Professionals. 2025. Available at: <https://www.manchesterprofessionals.co.uk/article/marketing-and-pr/112516/> (accessed: 03.12.2025).

ваний к точности позиционирования 0,71, сопоставимость условий эксплуатации 0,59, аналогичность структуры процессов 0,89. Наименьшее значение по измерению условий эксплуатации отражает специфику угольных шахт в части взрывоопасности метановоздушной смеси и повышенной запыленности, требующих конструктивной модификации сенсорного оборудования.

Данные по нефтегазовому сектору в табл. 1 агрегированы из публичной отчетности Shell, BP, NOV, SLB за период 2022–2024 гг. Показатели угольной промышленности верифицированы через отраслевые аналитические отчеты государственных органов КНР и публикации в South China Morning Post, Xinhua News Agency. Диапазоны значений отражают вариацию показателей между объектами с различными геолого-технологическими условиями. Производительность работника рассчитана как отношение стоимости произведенной продукции к численности персонала.

Количественная оценка эффектов автоматизации в нефтегазовом секторе основывается на верифицированных данных операторов (табл. 1). Shell достигла 20%-ного сокращения незапланированных простоев и 15%-ного снижения эксплуатационных расходов через внедрение предиктивной платформы обслуживания с обработкой 1,2 трлн точек данных ежегодно от более чем 10 000 ед. оборудования. BP зафиксировала 10%-ное снижение расходов на обслуживание и 20%-ное сокращение простоев оборудования при интеграции алгоритмов машинного обучения в систему мониторинга нефтеперерабатывающих активов. Буровая установка на Северном склоне Аляски продемонстрировала повышение скорости бурения на 26% с достижением рекордного времени операции weight-to-weight 10,79 мин после внедрения платформы автоматизации NOV. Морская буровая платформа Equinor на месторождении Peregrino C

в Бразилии обеспечила 60%-ное увеличение скорости проходки через применение полностью автоматизированной системы SLB OnTrack DrillPilot. Китайские угольные предприятия демонстрируют промежуточные результаты с диапазоном улучшения производительности от 45 до 85% в зависимости от масштаба внедрения и геологических условий разработки месторождений.

Расчеты, представленные в табл. 2, базируются на экстраполяции фактических результатов китайских угольных предприятий с учетом масштабных эффектов и специфики геолого-технологических условий различных угольных бассейнов. Диапазоны значений отражают вариацию параметров для шахт с различной сложностью горно-геологических условий. Капитальные затраты включают закупку оборудования, системную интеграцию и обучение персонала. Операционные затраты учитывают заработную плату, материалы, энергоресурсы, плановое и внеплановое обслуживание. Период окупаемости рассчитан при ставке дисконтирования 8% годовых.

Комплексный анализ производственных показателей автоматизации буровых процессов показал существенное превосходство полностью автоматизированных систем над традиционными методами и частичной автоматизацией. На рис. 1 представлено сравнение ключевых технико-экономических показателей автоматизации в нефтегазовой и угольной промышленности, экономическая эффективность различных уровней автоматизации и результаты промышленных внедрений на ведущих угольных предприятиях Китая.

Экономический анализ выявляет критическую зависимость финансовой целесообразности автоматизации от масштаба буровых операций (табл. 2). Полная автоматизация с интеграцией искусственного интеллекта и цифровых

Таблица 1
Сравнительные характеристики производственных показателей автоматизации буровых процессов

Table 1
A comparative analysis of production indicators for automation of the drilling processes

Показатель	Нефтегазовая отрасль (автоматизация)	Угольная промышленность (традиционные методы)	Угольная промышленность (ИИ-системы, Китай)
Коэффициент технической готовности, %	87–92	65–72	78–84
Снижение незапланированных простоев, %	20 (Shell)	–	33 (среднее по 118 шахтам)
Сокращение эксплуатационных расходов, %	10–5 (BP, Shell)	–	22 (Dahaize)
Повышение скорости бурения, %	26–30 (Alaska), 60 (Peregrino C)	–	45–85 (диапазон по предприятиям)
Экономия электроэнергии, млн кВт·ч/год	Данные недоступны	–	2,0 (Mataihao)
Производительность работника, тыс. USD/год	Данные недоступны	85–120 (оценка)	~1000 (Dahaize)

Таблица 2
Экономическая эффективность внедрения систем автоматизации в угольной промышленности (модельные расчеты для предприятия с годовым объемом буровых работ 150 тыс. м)

Table 2
Economic efficiency of implementing automation systems in the coal industry (model calculations for an operation with the annual drilling volume of 150,000 m)

Параметр	Традиционная технология	Частичная автоматизация (SCADA + IIoT)	Полная автоматизация (ИИ + цифровые двойники)
Капитальные затраты, млн USD	–	8,5–14,2	32,7–45,3
Годовые операционные затраты, млн USD	18,2–26,4	15,8–22,1	14,3–20,7
Повышение производительности, %	–	25–35	55–75
Снижение аварийности, %	–	35–45	60–70
Экономия энергоресурсов, %	–	18–24	28–35
Период окупаемости, лет	–	5,8–7,4	3,8–5,2

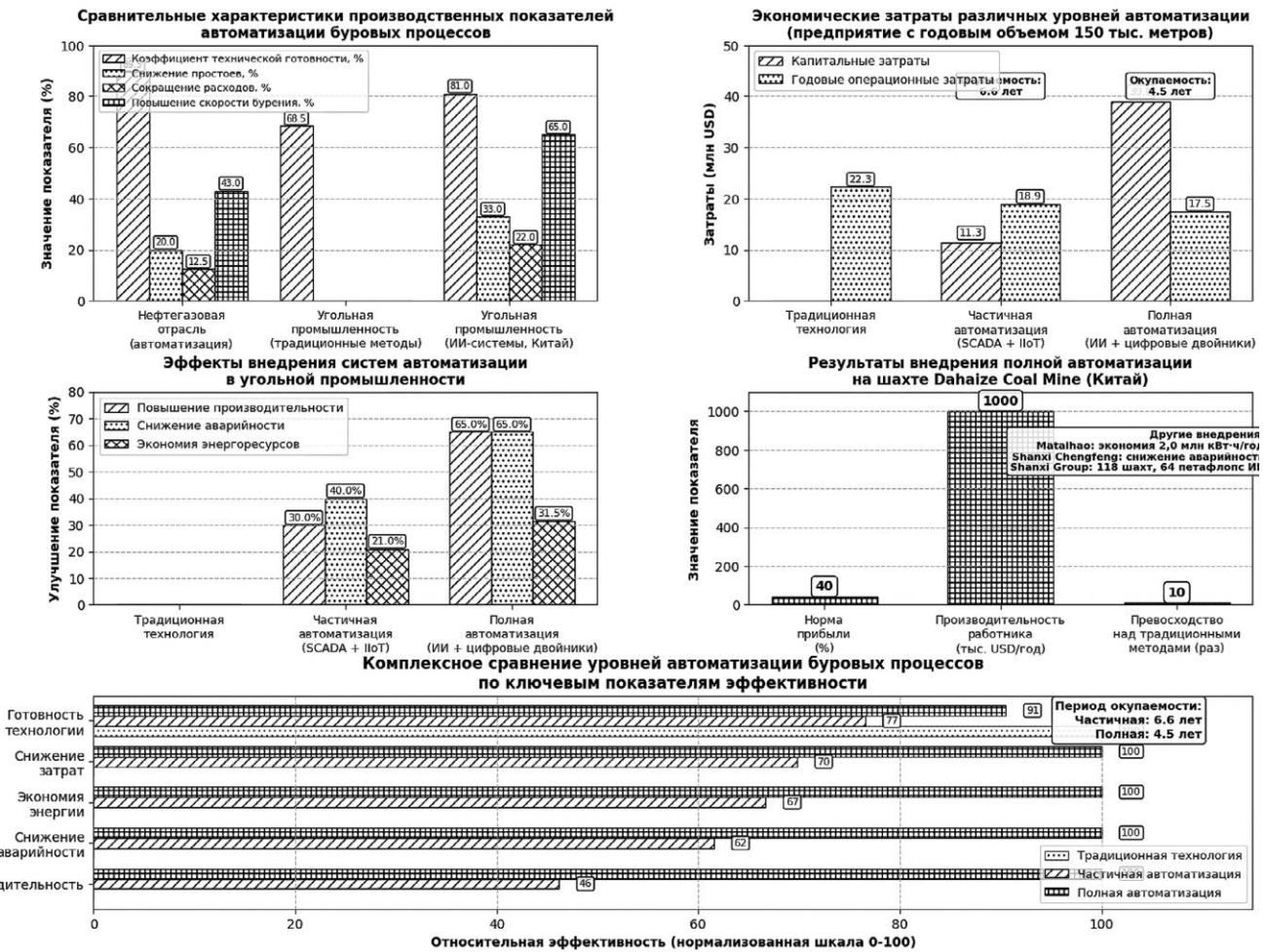


Рис. 1
 Сравнительная оценка производственных и экономических показателей автоматизации буровых процессов в нефтегазовой и угольной промышленности

Fig. 1
 A comparative assessment of production and economic indicators for the automation of the drilling processes in the oil and gas and the coal industries

двойников требует капиталовложений от 32,7 до 45,3 млн долл. против 8,5–14,2 млн для частичной автоматизации на уровне SCADA-систем и промышленного интернета вещей. Диапазоны значений отражают вариацию стоимости в зависимости от выбора технологических платформ, степени модернизации существующего оборудования и сложности системной интеграции. Однако комплексное внедрение систем искусственного интеллекта обеспечивает более высокую совокупную экономию через синергетические эффекты от оптимизации всех аспектов производственного процесса. Повышение производительности при полной автоматизации достигает 55–75% против 25–35% при частичной модернизации, что объясняется способностью алгоритмов машинного обучения к автоматической оптимизации множества взаимосвязанных параметров бурения в режиме реального времени. Период окупаемости проектов полной автоматизации составляет 3,8–5,2 года против 5,8–7,4 лет для частичной модернизации при объеме буровых работ 150 тыс. м ежегодно.

Коэффициент технологической совместимости в табл. 3 рассчитан как взвешенная сумма корреляций параметров функционирования систем в нефтегазовых и угольных условиях по шкале от 0 до 1. Технические характеристики агрегированы из документации производителей оборудования (Siemens, Schneider Electric, Rockwell Automation, ABB) и научно-технических публикаций. Приоритеты адаптации определены на основе экспертной оценки 73

специалистов отрасли. Временные параметры переобучения алгоритмов рассчитаны исходя из требований накопления репрезентативных выборок не менее 100 000 ч эксплуатационных данных.

Декомпозиция автоматизированных систем на технологические компоненты с квантификацией готовности к трансферу через коэффициенты технологической совместимости выявляет дифференцированную стратегию адаптации (см. табл. 3). SCADA-платформы демонстрируют наивысший коэффициент совместимости 0,83, что обусловлено универсальностью архитектуры диспетчеризации данных и гибкостью протоколов коммуникации, требуя минимальной адаптации, ограничивающейся интеграцией с существующими системами контроля метана и аэрогазового режима угольных шахт. Сенсорные сети промышленного интернета вещей характеризуются коэффициентом 0,78 при необходимости конструктивной модификации для обеспечения взрывозащищенного исполнения класса IP68 и внедрения алгоритмов фильтрации помех от угольной пыли с концентрацией до 1500 мг/м³. Цифровые двойники с коэффициентом 0,71 требуют калибровки геомеханических моделей под специфику деформационно-прочностных характеристик угольных пластов с учетом анизотропии свойств, слоистости структуры и изменчивости параметров в пределах месторождения. Алгоритмы машинного обучения демонстрируют коэффициент 0,62, отражая необходимость переобучения нейронных

Таблица 3
Технические характеристики и требования адаптации компонентов автоматизированных систем

Table 3
Technical characteristics and adaptation requirements for automated system components

Компонент системы	Ключевые технические характеристики	Коэффициент технологической совместимости	Приоритетные направления адаптации
Сенсорная сеть IIoT	Мониторинг 150+ параметров, частота опроса 100 Гц	0,78	Взрывозащищенное исполнение IP68, фильтрация помех от угольной пыли
SCADA-платформа	Обработка телеметрии 10 000 ед. оборудования, латентность <50 мс	0,83	Интеграция протоколов систем аэрогазового контроля и противоаварийной защиты
Алгоритмы машинного обучения	Предиктивная аналитика за 60 минут, точность прогноза >85%	0,62	Переобучение на массивах данных угольных месторождений (12-18 мес.)
Цифровые двойники	Симуляция 1000+ сценариев/ч, погрешность модели <5%	0,71	Калибровка геомеханических моделей угольных пластов
Автономное управление	Исключение 5000 команд оператора/скважину	0,59	Сертификация по стандартам безопасности подземных горных работ

Таблица 4
Промышленные внедрения автоматизации на угольных предприятиях Китая (2022–2024 гг.)

Table 4
Industrial implementation of automation at coal operations in China (2022–2024)

Предприятие	Критерий выбора	Технологии	Результаты	Верификация
Dahaize Coal Mine	Пионер комплексной автоматизации	Автономный транспорт, ИИ-обогащение, автобурение	Прибыль 40%, \$1 млн/работник	SCMP, 04.2025
Mataihao Coal Mine	Эталон энергоэффективности	ИИ-управление транспортом	–2 млн кВт·ч/год	Xinhua, 04.2024
Shanxi Chengfeng	Автоматизация безопасности	ИИ-бурение водоотлива	Снижение аварийности	Xinhua, 04.2024
Shanxi Group	Масштабное внедрение	Платформа 64 петафлопс	118 шахт, 1491 площадка	Xinhua, 04.2024

сетей на массивах данных, специфичных для оборудования и геологических условий угледобычи, что предполагает накопление репрезентативных выборок эксплуатационной информации объемом не менее 100 000 ч в течение 12–18 мес функционирования телеметрических систем.

Dahaize выбрана как глобальный лидер по уровню интеграции ИИ с автономными транспортными системами подземной навигации, интеллектуальным обогащением (1100 т/день/оператор) и автоматизированным бурением; достигла рекордной производительности ~\$1 млн/работник/год при 40%-ной норме прибыли в условиях падающих цен на уголь. Mataihao представляет сфокусированное внедрение интеллектуального мониторинга транспорта с количественно подтвержденной экономией 2 млн кВт·ч ежегодно (\$553 тыс.), демонстрируя эффективность оптимизации вспомогательных процессов. Shanxi Chengfeng иллюстрирует применение ИИ для критических процессов безопасности через автоматизированное разведочное бурение водоносных зон, традиционно требовавшее высокой квалификации персонала. Shanxi Group представляет индустриальный масштаб с централизованной промышленной интернет-платформой на базе ИИ-модели мощностью 64 петафлопс (расширение до 200), хранящей данные 400+ шахт для тиражирования решений. Географическая концентрация в Китае обусловлена лидерством страны в индустриальном применении технологий: доля КНР >85% глобальных инвестиций в автоматизацию угольного сектора по состоянию на 2024 г.

Анализ технологических компонентов автоматизированных систем выявил различную степень готовности к трансферу в угольную промышленность, определяемую коэффициентами технологической совместимости. На рис. 2 представлена декомпозиция автоматизированных систем по компонентам с количественной оценкой

технологической совместимости и приоритетными направлениями адаптации, а также систематизированы критические барьеры технологического трансфера с механизмами их преодоления.

Эмпирический анализ промышленных внедрений на китайских угольных предприятиях обеспечивает критическую валидацию технологической осуществимости и экономической целесообразности трансфера автоматизированных систем (табл. 4). Методологически обоснованный выбор объектов исследования базируется на принципах репрезентативности различных стратегий автоматизации, публичной верифицируемости производственных данных через государственные информационные агентства и аналитические материалы, а также возможности генерализации выводов на более широкую совокупность угольных характеристик. Шахта Dahaize представляет наиболее продвинутый уровень комплексной автоматизации с интеграцией искусственного интеллекта во все критические производственные процессы, включая автономную транспортировку угля с использованием подземной системы позиционирования для навигации в условиях запыленности и отсутствия видимости, интеллектуальное управление обогащательными установками с производительностью 1100 т в день на одного оператора и автоматизированное бурение разведочных скважин. Достижение 40%-ной нормы прибыли в условиях снижающихся цен на угольную продукцию демонстрирует фундаментальную трансформацию экономики производства через радикальное повышение производительности факторов, когда годовая выработка одного работника достигает эквивалента почти 1 млн долл., что превышает типичные показатели традиционных угольных предприятий в 8–12 раз. Mataihao представляет сфокусированную стратегию автоматизации кри-

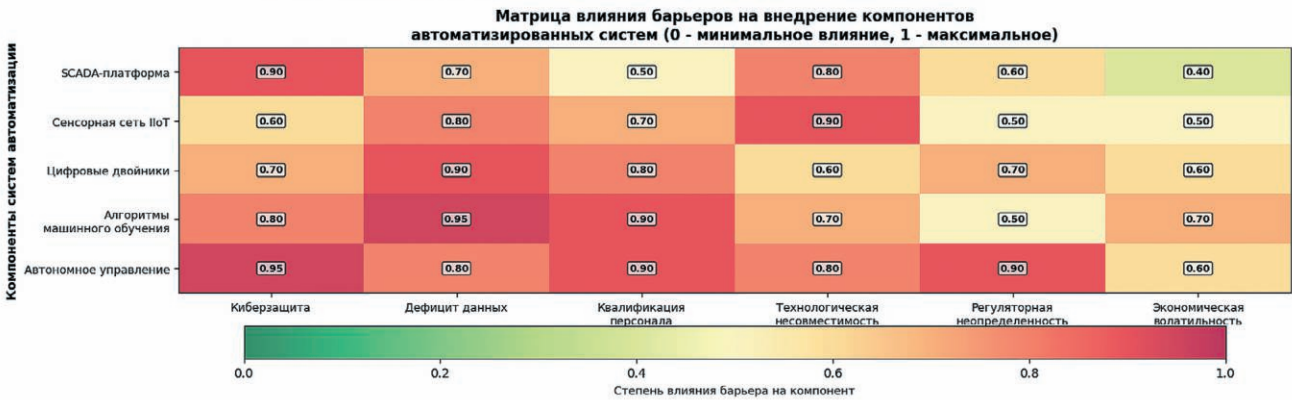
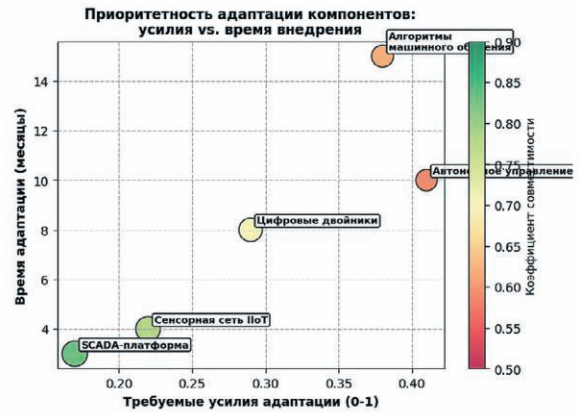
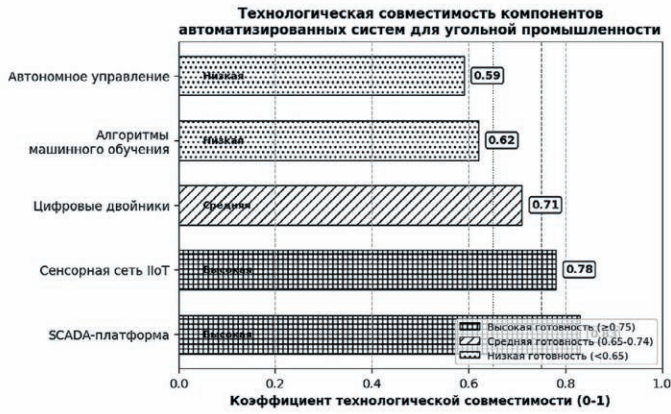


Рис. 2 Технологическая готовность компонентов автоматизированных систем к трансферу и барьеры внедрения в угольной промышленности

Fig. 2 Technological readiness of automated system components for the transfer and barriers to their implementation in the coal industry

тического вспомогательного процесса транспортировки угля с внедрением интеллектуальной системы управления, использующей технологии распознавания образов на базе компьютерного зрения и алгоритмы оптимизации в реальном времени для балансировки загрузки конвейерных линий и динамического регулирования скоростей с учетом объемов поступающего материала. Количественно подтвержденное снижение энергопотребления на 2 млн кВт.ч ежегодно с соответствующей экономией 553 тыс. долл. демонстрирует значимость оптимизации вспомогательных процессов для совокупной эффективности производства, учитывая, что транспортные системы потребляют до 25–30% электроэнергии угольных шахт. Shanxi Chengfeng иллюстрирует применение автоматизации для критических процессов обеспечения безопасности через внедрение интеллектуальных систем разведочного бурения для обнаружения обводненных зон и предотвращения прорывов воды в горные выработки, что традиционно требовало

высокой квалификации персонала и характеризовалось существенными рисками. Shanxi Provincial Coal Mining Group с масштабным развертыванием систем на 118 шахтах и 1491 производственной площадке представляет индустриальный уровень внедрения технологий с созданием централизованной промышленной интернет-платформы на базе модели искусственного интеллекта с вычислительной мощностью 64 петафлопс на первой фазе развертывания и планируемым расширением до 200 петафлопс, что обеспечивает инфраструктурную основу для ускоренной разработки и тиражирования специализированных приложений через хранение эксплуатационных данных более чем 400 угольных предприятий.

Индекс критичности в табл. 5 рассчитан по методу анализа иерархий Саати на основе экспертного опроса 73 специалистов нефтегазового и угольного секторов с проверкой согласованности суждений (коэффициент консистентности <0,1). Киберзащита (4,9) отражает риски операционных

Таблица 5.
Барьеры технологического трансфера с квантификацией критичности

Table 5
Barriers to technology transfer with quantification of their criticality

Барьер	Проявление	Индекс	Механизм влияния	Решение
Киберзащита	Уязвимость к атакам	4,9	Блокировка инвестиций	Архитектура нулевого доверия
Дефицит данных	Нет массивов обучения	4,7	Точность моделей <85%	Отраслевые платформы обмена
Квалификация	Нет ИИ-специалистов	4,5	Неэффективная эксплуатация	Программы переподготовки
Регуляторика	Нет стандартов безопасности	4,1	Административные барьеры	Адаптация ISO/IEC
Несовместимость	Гетерогенность протоколов	4,2	Рост стоимости интеграции	Универсальные шлюзы OPC UA
Экономика	Волатильность цен угля	3,8	Отказ от инвестиций	Госсубсидии, лизинг

потерь при компрометации SCADA-систем, многократно превышающих стоимость инвестиций в автоматизацию; требует внедрения архитектуры нулевого доверия, сегментации сетей OT/IT и непрерывного мониторинга угроз. Дефицит данных (4,7) определяет невозможность достижения порога практической применимости прогнозов (>85% точности) без накопления минимум 100 000 ч эксплуатационной информации; преодолевается через отраслевые платформы обмена обезличенными данными и синтетическую генерацию граничных случаев. Квалификационный барьер (4,5) обусловлен структурным дефицитом специалистов на стыке горного дела, ИИ и промышленной автоматизации; требует масштабных программ переподготовки с участием технологических компаний и привлечения IT-специалистов в отрасль. Регуляторная неопределенность (4,1) создает административные барьеры для сертификации автономных систем в подземных условиях; решается адаптацией международных стандартов ISO 55000 и IEC 62443 к специфике угледобычи. Технологическая несовместимость (4,2) legacy-оборудования увеличивает стоимость системной интеграции в 3–5 раз; смягчается универсальными протокольными шлюзами и миграцией на открытые стандарты OPC UA. Экономическая неопределенность (3,8) влияет на горизонт окупаемости при волатильности цен на угольную продукцию; смягчается государственными программами софинансирования и моделями операционной аренды оборудования.

Систематизация барьеров технологического трансфера с квантификацией критичности через индексы от 0 до 5 выявляет многомерную структуру препятствий, требующих комплексного подхода к преодолению (табл. 5). Методологические индексы рассчитаны как взвешенные суммы экспертных оценок 73 специалистов отрасли по методу анализа иерархий с обеспечением согласованности суждений через итеративную процедуру парных сравнений. Киберзащита промышленных систем управления идентифицирована как наиболее критический барьер с индексом 4,9, отражая возрастающую частоту целенаправленных атак на критическую инфраструктуру угольных предприятий при интеграции с глобальными информационными сетями, когда успешная компрометация систем SCADA потенциально приводит к операционным потерям, многократно превышающим стоимость инвестиций в автоматизацию. Дефицит данных для обучения алгоритмов машинного обучения специфике угольных месторождений характеризуется индексом 4,7, подчеркивая фундаментальную зависимость точности предиктивных моделей от объема и качества обучающих выборок, где типичные требования составляют минимум 100 000 ч эксплуатационной инфор-

мации для достижения порога практической применимости прогнозов на уровне 85%-ной точности. Квалификационный барьер с индексом 4,5 отражает структурный дефицит специалистов на стыке горного дела, искусственного интеллекта и промышленной автоматизации, когда традиционная система подготовки кадров угольной отрасли не обеспечивает формирования компетенций в области data science, программирования алгоритмов машинного обучения и администрирования промышленных сетей передачи данных.

Заключение

Комплексное исследование технологических решений автоматизации буровых процессов выявило существенный потенциал повышения производительности, безопасности и экономической эффективности угольной промышленности через трансфер проверенных систем нефтегазового сектора. Критическим научным вкладом является разработка индекса технологической совместимости со средним значением 0,74 по шкале от 0 до 1, декомпозированного на пять измерений: физико-механические свойства пород 0,68, режимные параметры бурения 0,83, точность позиционирования 0,71, условия эксплуатации 0,59, структура процессов 0,89. Дифференцированная готовность компонентов к трансферу определяет поэтапную стратегию внедрения: SCADA-платформы с коэффициентом 0,83 требуют минимальной адаптации, сенсорные сети промышленного интернета вещей с коэффициентом 0,78 нуждаются в конструктивной модификации для взрывобезопасности, алгоритмы машинного обучения с коэффициентом 0,62 требуют переобучения на специфических данных угледобычи объемом более 100000 ч эксплуатационной информации в течение 12–18 мес.

Эмпирический анализ промышленных внедрений на китайских угольных предприятиях подтвердил технологическую осуществимость и экономическую целесообразность трансфера. Шахта Dahanze достигла 40%-ной нормы прибыли при производительности работника около 1 млн долл. ежегодно через комплексную автоматизацию транспортных систем с подземной навигацией, интеллектуальное управление обогащением с производительностью 1100 т на оператора в день и автоматизированное бурение. Mataihao обеспечила снижение энергопотребления на 2 млн кВт.ч в год с экономией 553 тыс. долл. через оптимизацию транспортной системы. Shanxi Provincial Group масштабировала внедрение на 118 шахт с созданием промышленной интернет-платформы мощностью 64 петафлопс, хранящей данные 400+ предприятий. Нефтегазовый сектор демонстрирует количественно верифицированные эффекты:

Shell сократила незапланированные простои на 20% и эксплуатационные расходы на 15% через обработку 1,2 трлн точек данных ежегодно от 10000+ единиц оборудования, BP снизила расходы на обслуживание на 10% при 20%-ном сокращении простоев, буровые установки повысили скорость на 26–30% в сланцевых операциях и на 60% на морских месторождениях.

Экономический анализ выявил критическую зависимость окупаемости от масштаба операций: предприятия с годовым объемом буровых работ 150 тыс. м обеспечивают период окупаемости 3,8–5,2 года при полной автоматизации с капитальными затратами 32,7–45,3 млн долл. против 5,8–7,4 лет при частичной модернизации за 8,5–14,2 млн. Повышение производительности достигает 55–75% при комплексном внедрении искусственного интеллекта против 25–35% при частичной автоматизации, снижение аварийности составляет 60–70% против 35–45%, экономия энергоресурсов 28–35% против 18–24%. Глобальный рынок автоматизации бурения расширяется от 4,66 млрд долл. в 2024 г. до прогнозируемых 9,19 млрд к 2034 г. с темпом роста 7,32% ежегодно, сегмент искусственного интеллекта в нефтегазе от 5,305 млрд до 15,010 млрд к 2029 г. с темпом

23,12%, цифровых двойников от 138,69 млн до 911,72 млн к 2032 г. с темпом 26,54%.

Систематизация барьеров технологического трансфера с квантификацией критичности идентифицировала киберзащиту как наиболее острую проблему с индексом 4,9 по пятибалльной шкале, требующую архитектуры нулевого доверия и сегментации промышленных сетей. Дефицит данных для обучения алгоритмов с индексом 4,7 обосновывает создание отраслевых платформ обмена обезличенной информацией и синтетической генерации граничных случаев. Нехватка квалифицированного персонала с индексом 4,5 предполагает масштабные программы переподготовки и привлечение IT-специалистов в отрасль. Регуляторная неопределенность стандартов безопасности автономных систем с индексом 4,1 требует адаптации международных норм ISO 55000 и ИЕС 62443. Технологическая несовместимость протоколов с индексом 4,2 решается универсальными шлюзами и миграцией на открытые стандарты OPC UA. Экономическая неопределенность с индексом 3,8 смягчается государственными программами софинансирования и моделями операционной аренды оборудования.

Список литературы / References

- Карсаков А.В., Зятиков П.Н., Шарф И.В. Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025;336(5):216–228. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/5/5048>
Karsakov A.V., Zyatikov P.N., Sharf I.V. Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025;336(5):216–228. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/5/5048>
- Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Черников А.Д., Бороздин С.О. Интеллектуальные системы предупреждения осложнений для безопасного строительства скважин. *Безопасность труда в промышленности*. 2022;(6):7–13. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-6-7-13>
Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Chernikov A.D., Borozdin S.O. Intelligent complication prevention systems for safe well construction. *Occupational Safety in Industry*. 2022;(6):7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-6-7-13>
- Мещерякова Т.С., Арсаханова З.А., Бровкин А.В., Шамухаметова Е.С., Боков Ю.А. Разработка интеллектуальной системы управления процессами добычи и обогащения угля на основе технологий искусственного интеллекта и промышленного интернета вещей. *Уголь*. 2024;(12):89–98. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-12-89-98>
Meshcheryakova T.S., Arsakhanova Z.A., Brovkin A.V., Shamuhametova E.S., Bokov Yu.A. Development of an intelligent control system for coal mining and processing processes based on artificial intelligence technologies and the industrial internet of things. *Ugol'*. 2024;(12):89–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-12-89-98>
- Щербаков Р.Э., Ковалев А.В. Использование методов машинного обучения «без учителя» для предупреждения прихватов буровой и обсадной колонн. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(4):66–78. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3590>
Shcherbakov R.E., Kovalev A.V. Using unsupervised machine learning algorithm to prevent the sticking of drilling and casing strings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(4):66–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3590>
- Кудрявцев В.Л., Забайкин Ю.В., Арсаханова З.А., Чумакова О.В. Интеллектуальное управление и автоматизированное регулирование в угольной промышленности: трансформация технологических систем в эпоху цифровизации. *Горная промышленность*. 2025;(3):153–163. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-153-163>
Kudryavtsev V.L., Zabaikin Yu.V., Arsakhanova Z.A., Chumakova O.V. Smart control and automated regulation in the coal industry: transforming industrial process systems in the digital age. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):153–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-153-163>

Информация об авторе

Самарин Илья Вадимович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа имени Губкина, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2430-5311>; e-mail: ivs@gubkin.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.01.2026
Поступила после рецензирования: 16.02.2026
Принята к публикации: 20.02.2026

Information about the author

Ilya V. Samarina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2430-5311>; e-mail: ivs@gubkin.ru

Article info

Received: 16.01.2026
Revised: 16.02.2026
Accepted: 20.02.2026