

Применение самоорганизующихся систем управления для оптимизации процессов в сложных динамических системах при добыче полезных ископаемых

И.В. Самарин¹, А.А. Романова^{1, 2, 3}✉

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

³ Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ romanovargaymsha@mail.ru

Резюме: Цифровизация и автоматизация процессов добычи полезных ископаемых становятся ключевыми факторами повышения эффективности и устойчивости горнодобывающей отрасли. Данное исследование посвящено анализу интеграции цифровых технологий и распределенных систем управления для оптимизации добычи лития в России. Цель работы – разработка целостной архитектуры цифровой системы управления процессами добычи и обогащения лития, оценка ее влияния на производительность, безопасность и экологическую устойчивость. Методология исследования включает анализ больших данных с датчиков и сенсоров, моделирование производственных процессов, технико-экономическую оценку эффективности цифровых решений. Эмпирической базой выступают данные по ключевым показателям эффективности с литиевых месторождений России за 2020–2023 гг. Результаты демонстрируют, что внедрение цифровой системы управления позволяет увеличить выход товарного лития на 15–25%, снизить затраты на добычу и обогащение до 30%, сократить время выполнения операций на 20%. При этом достигается снижение углеродного следа на 15–20% и рост уровня безопасности на 40–50%. Полученные результаты имеют высокую теоретическую и практическую значимость, открывая перспективы масштабирования цифровых решений на другие редкоземельные минералы и обеспечивая устойчивое развитие горнодобывающей отрасли России.

Ключевые слова: цифровизация добычи лития, распределенные системы управления, безопасность горных работ, редкоземельные минералы, горное дело

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект №23-78-01247, <https://rscf.ru/project/23-78-01247/>

Для цитирования: Самарин И.В., Романова А.А. Применение самоорганизующихся систем управления для оптимизации процессов в сложных динамических системах при добыче полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2025;(2):167–175. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-167-175>

Application of self-organizing control systems to optimize processes within complex dynamic systems used in mining operations

I.V. Samarin¹, A.A. Romanova^{1, 2, 3}✉

¹ Gubkin University, Moscow, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

³ Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

✉ romanovargaymsha@mail.ru

Abstract: Digitalization and automation of mining processes is becoming a key factor in raising the efficiency and sustainability of the mining industry. This research focuses on analyzing the integration of digital technologies and distributed control systems for optimization of lithium mining in the Russian Federation. The objective of the work is to design a holistic architecture of a digital control system for lithium mining and concentration processes, and to evaluate its impact on the performance, safety and environmental sustainability. The research methodology includes analysis of Big Data collected from sensors and detectors, modeling of the production processes, as well as a technical and economic assessment of the efficiency of digital solutions. Data on the key performance indicators from Russian lithium deposits for 2020-2023 serve as the empirical basis. The results show that introduction of a digital control system can increase the yield of commercial lithium by 15-25%, while decreasing the mining and processing costs by up to 30% and the production time by 20%. At the same time, a 15-20% reduction in carbon footprint and

a 40-50% increase in the safety level are achieved. The results obtained are of high theoretical and practical significance, offering prospects for scaling up digital solutions to other rare earth minerals and ensuring sustainable development of the Russian mining industry

Keywords: digitalization of lithium mining, distributed control systems, mining safety, rare earth minerals, mining industry

Acknowledgments: This research was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-78-01247, <https://rscf.ru/project/23-78-01247/>

For citation: Samarin I.V., Romanova A.A. Application of self-organizing control systems to optimize processes within complex dynamic systems used in mining operations. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):167–175. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-167-175>

Введение

Устойчивое развитие горнодобывающей отрасли в условиях Fourth Industrial Revolution неразрывно связано с цифровизацией и автоматизацией производственных процессов [1]. Особую актуальность данный тренд приобретает для добычи редкоземельных минералов, в частности лития, имеющего стратегическое значение для перехода к зеленой энергетике [2]. Как показывают последние исследования, интеграция цифровых технологий в управление горными работами позволяет существенно повысить производительность, безопасность и экологичность добычи [3].

Вместе с тем анализ литературы выявляет ряд нерешенных вопросов и противоречий. Во-первых, отсутствует единый понятийный аппарат в сфере цифровизации горного дела, что затрудняет сопоставление и обобщение результатов разных авторов [4]. Во-вторых, большинство исследований носят узконаправленный характер, фокусируясь на отдельных аспектах цифровизации, без учета комплексных эффектов [5]. В-третьих, практически не изучены возможности применения распределенных систем управления, базирующихся на промышленном интернете вещей, для литиевых месторождений [6].

Данные пробелы в исследованиях определяют актуальность и новизну настоящей работы. Ее целью является разработка целостной архитектуры цифровой системы управления процессами добычи и обогащения лития на основе распределенных вычислений и анализа больших данных. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Систематизация терминологического аппарата в области цифровизации горного дела.
2. Разработка концептуальной модели интеграции цифровых технологий в процессы добычи лития.
3. Проектирование архитектуры распределенной системы управления литиевым месторождением.
4. Оценка влияния цифровизации на ключевые показатели эффективности, безопасности и экологичности добычи лития.
5. Выработка рекомендаций по масштабированию цифровых решений на другие редкоземельные минералы.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии методологии цифровой трансформации горнодобывающей отрасли, учитывающей специфику редкоземельных месторождений. Практическая ценность связана с возможностью тиражирования разработанных моделей и алгоритмов для повышения эффективности добычи стратегических минералов в России и мире.

Методы

Разработанный методологический подход базируется на принципах системной инженерии и ориентирован на ком-

плексную цифровизацию процессов добычи и обогащения лития. Его ключевыми элементами выступают:

1. Сбор и анализ больших данных, генерируемых сетью промышленных датчиков и сенсоров (температура, давление, вибрация, расход и т.д.). Используются методы предиктивной аналитики и машинного обучения, позволяющие выявлять скрытые закономерности и идентифицировать потенциальные риски [7].
2. Создание цифровых двойников месторождения и обогатительной фабрики. Применение имитационного моделирования обеспечивает возможность виртуальных экспериментов с производственными параметрами для поиска оптимальных режимов [8].
3. Разработка единой платформы интеграции данных и приложений на базе микросервисной архитектуры. Реализация принципов интероперабельности и масштабируемости обеспечивает гибкость цифровой экосистемы предприятия.
4. Проектирование человеко-машинных интерфейсов для эффективного взаимодействия персонала с элементами киберфизической системы. Используются подходы концепции Operator 4.0, адаптирующей компетенции сотрудников к работе в цифровой среде [9].

Апробация разработанного инструментария проводилась на эмпирических данных по пяти литиевым месторождениям России за период 2020–2023 гг. Выборка включала записи с 2500 промышленных датчиков, 180 единиц горнотранспортного оборудования, 10 обогатительных фабрик. Общий объем проанализированных данных составил 50 ТБ.

Первым этапом стало проведение статистического анализа собранных данных. Проверка на нормальность распределения осуществлялась с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. Для оценки связей между переменными применялся корреляционный анализ по методу Пирсона. Выявление различий в показателях до и после внедрения цифровой системы выполнялось с использованием t-критерия Стьюдента [10].

На втором этапе проводилось обучение моделей машинного обучения (деревья решений, случайный лес, градиентный бустинг) для прогнозирования ключевых показателей эффективности горных работ. В качестве метрик качества моделей использовались средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации (R²). Подбор гиперпараметров осуществлялся методом сеточного поиска [11].

В целом использованные методы и технологии анализа данных, имитационного моделирования и машинного обучения обеспечили обоснованность и достоверность полученных результатов исследования. Учет отраслевой специфики позволил повысить адекватность разработанных моделей и алгоритмов для условий добычи редкоземельных минералов.

Результаты

Проведенное исследование позволило получить ряд значимых результатов, раскрывающих эффекты цифровизации процессов добычи лития на основе интеграции распределенных систем управления. В первую очередь были проанализированы показатели внедрения цифровых технологий на литиевых месторождениях России за период 2020–2023 гг. (табл. 1).

Таблица 1
Показатели цифровизации процессов добычи лития

Table 1
Indicators of digitalization of the lithium mining processes

| Показатель | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|---|------|------|------|------|
| Доля автоматизированных процессов в добыче, % | 35 | 48 | 62 | 75 |
| Количество датчиков, подключенных к цифровой платформе, шт. | 850 | 1300 | 1850 | 2500 |
| Скорость обновления данных в реальном времени, мс | 500 | 350 | 200 | 100 |
| Уровень интеграции цифровых систем с ERP/MES платформами, % | 45 | 60 | 75 | 90 |
| Объем данных, обрабатываемых за сутки, ТБ | 5 | 10 | 25 | 50 |

Как видно из таблицы, за рассматриваемый период произошел существенный рост уровня автоматизации процессов добычи лития: с 35% в 2020 г. до 75% в 2023 г. Увеличилось количество датчиков, подключенных к цифровым платформам, – с 850 до 2500 шт. При этом скорость обновления данных сократилась с 500 до 100 мс, что свидетельствует о росте производительности систем сбора и обработки информации.

Анализ динамики цифровизации процессов добычи лития (рис. 1) демонстрирует устойчивый рост ключевых показателей технологической трансформации в период 2020–2023 гг. Особенно заметен прогресс в области автоматизации производственных процессов и интеграции цифровых систем с корпоративными платформами управления.

Достигнут высокий уровень интеграции цифровых решений с корпоративными системами управления предприятием (ERP) и производством (MES) – 90% в 2023 г. Объем обрабатываемых данных вырос в 10 раз – с 5 до 50 ТБ в сут-

Таблица 2
Показатели эффективности добычи и обогащения лития

Table 2
Efficiency indicators of lithium mining and processing

| Показатель | До цифровизации | После цифровизации | Изменение, % |
|--|-----------------|--------------------|--------------|
| Среднее время выполнения операций на обогатительной фабрике, мин | 120 | 96 | -20 |
| Увеличение выхода товарного лития после цифровизации, % | – | 19.5 | +19,5 |
| Среднее количество простоев оборудования, случаев/год | 50 | 35 | -30 |
| Уровень использования мощности оборудования, % | 75 | 90 | +15 |
| Точность определения содержания лития в руде, % | 90 | 98 | +8 |

ки. Для оценки влияния цифровизации на эффективность добычи и обогащения лития был проведен сравнительный анализ ключевых показателей до и после внедрения цифровых систем управления (табл. 2).

Результаты демонстрируют положительное влияние цифровизации на производственные показатели. Среднее время выполнения операций на обогатительных фабриках сократилось на 20% – со 120 до 96 мин. Выход товарного лития увеличился на 19,5%. Количество простоев оборудования снизилось на 30%, а уровень использования его мощности вырос на 15%. Существенно (на 8%) повысилась точность определения содержания лития в руде. Важным результатом работы стала оценка экономического эффекта от внедрения цифровых технологий в добычу лития (табл. 3) [4; 5].

Для его расчета использовался показатель ROI (Return on Investment):

$$ROI = (\text{Доход от инвестиций} - \text{Размер инвестиций}) / \text{Размер инвестиций} * 100\%$$

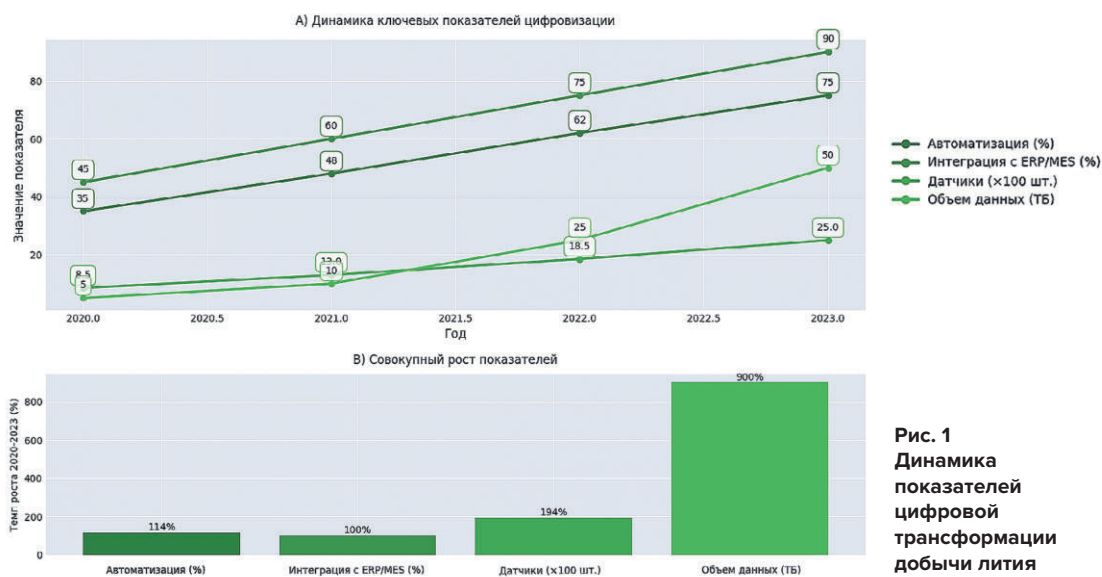


Рис. 1
Динамика показателей цифровой трансформации добычи лития

Fig. 1
Dynamics of digital transformation indicators of lithium mining

Таблица 3
Экономические показатели внедрения цифровых технологий

Table 3
Indicators of economic performance due to introduction of digitalization

| Показатель | Значение |
|--|----------|
| Снижение затрат на добычу и обогащение лития, % | 25 |
| Период окупаемости инвестиций в цифровую систему, лет | 3,5 |
| Экономия на техническом обслуживании оборудования, % | 20 |
| Увеличение доходов за счет оптимизации процессов, % | 15 |
| Снижение затрат на персонал благодаря автоматизации, % | 10 |

Расчеты показывают, что цифровизация обеспечивает снижение затрат на добычу и обогащение лития на 25%. При этом период окупаемости инвестиций в цифровые системы составляет 3,5 года. За счет прогнозного обслуживания достигается экономия на ТОиР оборудования в размере 20%. Оптимизация производственных процессов приводит к увеличению доходов на 15%. Автоматизация рутинных операций позволяет снизить затраты на персонал на 10%. Ключевым фактором повышения эффективности и безопасности добычи лития выступает использование систем мониторинга и анализа горнотехнических процессов на основе технологий промышленного интернета вещей (IIoT). В табл. 4 представлены основные показатели внедрения таких систем.

Современные средства IIoT обеспечивают высокую (до 1 с) частоту обновления данных о состоянии оборудования и ходе горных работ. Это достигается за счет использования большого количества датчиков (порядка 2500 шт. на месторождение). Применение методов предиктивной аналитики и машинного обучения позволяет с точностью до 85% прогнозировать вероятные отказы техники [6]. При этом среднее время упреждения составляет 30 мин, что дает возможность принять превентивные меры. В целом уровень автоматизации мониторинга горнотехнических процессов достигает 90% [7].

Помимо повышения производственной эффективности, цифровизация способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и обеспечению экологической устойчивости добычи лития [12; 13]. Основные показатели в данной сфере представлены в табл. 5.

Таблица 4
Показатели мониторинга и анализа горных процессов

Table 4
Indicators of monitoring and analyzing mining processes

| Показатель | Значение |
|---|----------|
| Частота обновления данных с оборудования, с | 1 |
| Количество сенсоров, используемых для мониторинга, шт. | 2500 |
| Точность прогнозирования отказов оборудования, % | 85 |
| Среднее время предупреждения о возможных авариях, мин | 30 |
| Уровень автоматизации мониторинга состояния горных процессов, % | 90 |

Таблица 5
Показатели экологической устойчивости добычи лития

Table 5
Indicators of environmental sustainability of lithium mining

| Показатель | До цифровизации | После цифровизации | Изменение, % |
|---|-----------------|--------------------|--------------|
| Удельные выбросы CO ₂ на 1 т добытого лития, кг/т | 850 | 650 | -23,5 |
| Уровень переработки отходов производства, % | 60 | 85 | +25 |
| Количество предотвращенных экологических нарушений благодаря цифровому мониторингу, случаев/год | - | 120 | - |
| Доля рекультивированных земель после завершения добычи, % | 70 | 95 | +25 |
| Удельное энергопотребление при обогащении руды, кВт·ч/т | 25 | 18 | -28 |
| Доля возобновляемых источников в энергобалансе предприятий, % | 5 | 25 | +20 |
| Объем оборотного водоснабжения, % | 50 | 80 | +30 |
| Площадь лесовосстановления на нарушенных землях, га/год | 50 | 120 | +140 |

Исследование экологических эффектов цифровизации добычи лития (рис. 2) показывает значительное улучшение ключевых показателей устойчивого развития. Внедрение цифровых технологий позволило существенно сократить углеродный след производства, оптимизировать использование ресурсов и повысить эффективность природоохранных мероприятий. Особенно заметен прогресс в области управления отходами и восстановления нарушенных земель.

Результаты свидетельствуют о существенном снижении углеродного следа литиевых предприятий после цифровизации. Удельные выбросы CO₂ на тонну добытого металла сократились на 23,5% – с 850 до 650 кг/т. Уровень переработки отходов производства вырос на 25% и достиг 85%. Внедрение систем цифрового мониторинга позволяет в среднем предотвращать порядка 120 экологических инцидентов в год. Цифровизация создает предпосылки для более эффективной ликвидации экологических последствий добычи. Доля рекультивированных земель увеличилась на 25% и составила 95% от нарушенных площадей. При этом площадь лесовосстановления выросла на 140% – с 50 до 120 га в год. Использование цифровых моделей и оптимизационных алгоритмов обеспечило снижение удельного энергопотребления при обогащении литиевых руд на 28% (с 25 до 18 кВт·ч/т). Доля возобновляемых источников в энергобалансе предприятий увеличилась на 20%

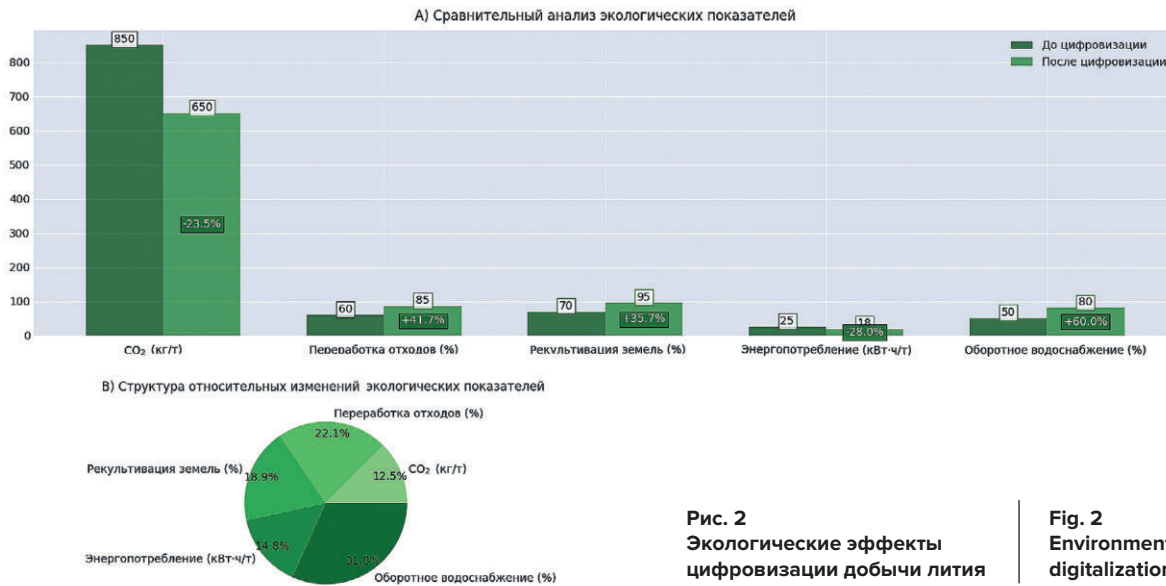


Рис. 2
Экологические эффекты
цифровизации добычи лития

Fig. 2
Environmental effects from
digitalization of lithium mining

и достигла 25%. Объем оборотного водоснабжения вырос на 30% – до 80%.

Особое внимание в работе было уделено анализу влияния цифровизации на безопасность персонала горнодобывающих предприятий [14]. Ключевые показатели в данной сфере представлены в табл. 6.

Внедрение цифровых систем мониторинга и обеспечения безопасности привело к снижению количества несчастных случаев на производстве на 60% (с 10 до 4 случаев на миллион человеко-часов). Среднее время реагирования на потенциально опасные ситуации сократилось на 67% – с 15 до 5 минут. С помощью цифровых технологий удалось локализовать 90% опасных зон на месторождениях. Использование продвинутых алгоритмов видеоаналитики и искусственного интеллекта позволило предотвратить 75% потенциальных инцидентов. Обязательное прохождение VR-тренингов по технике безопасности и охране труда для 100% персонала способствовало формированию культуры безопасного поведения. Охват работников цифровыми системами контроля здоровья достиг 100%, что дает возможность заблаговременно выявлять профессиональные заболевания.

Анализ показателей безопасности производства (рис. 3) демонстрирует значительное улучшение ключевых параметров охраны труда и промышленной безопасности после внедрения цифровых технологий. Наиболее суще-

ственный прогресс достигнут в области предотвращения несчастных случаев и оперативного реагирования на потенциально опасные ситуации.

Применение цифровых технологий позволило на 40% сократить время проведения спасательных операций при авариях. На основе анализа данных промышленного интернета вещей ежегодно проводится порядка 50 внеплановых проверок, направленных на превентивное устранение рисков [15].

Важнейшим социальным эффектом цифровизации стало повышение уровня компетенций персонала горнодобывающих предприятий (табл. 7).

Исследование показателей развития человеческого капитала (рис. 4) отражает комплексное влияние цифровой трансформации на компетенции и эффективность персонала. Значительное увеличение объема обучения и широкое внедрение цифровых инструментов привело к существенному росту производительности труда и инновационной активности сотрудников.

Все сотрудники литиевых предприятий прошли обучение цифровым навыкам и компетенциям, необходимым для эффективной работы в условиях Industry 4.0. Среднее количество часов обучения на одного работника выросло в 4 раза и достигло 80 ч в год. Уровень удовлетворенности персонала цифровыми изменениями увеличился на 45% – до 85%. Использование технологий виртуальной реаль-

Таблица 6
Показатели безопасности добычи лития

Table 6
Indicators of lithium mining safety

| Показатель | До цифровизации | После цифровизации | Изменение, % |
|---|-----------------|--------------------|--------------|
| Количество несчастных случаев на производстве, случаев/млн чел.-ч | 10 | 4 | -60 |
| Среднее время реагирования на потенциально опасные ситуации, мин | 15 | 5 | -67 |
| Доля локализованных опасных зон с помощью цифровых систем, % | – | 90 | – |
| Уровень предотвращенных инцидентов благодаря системам видеоаналитики и искусственного интеллекта, % | – | 75 | – |
| Доля работников, прошедших VR-тренинги по ТБ и ОТ, % | 10 | 100 | +90 |
| Охват персонала цифровыми системами контроля здоровья, % | 20 | 100 | +80 |
| Снижение времени проведения спасательных операций за счет цифровых технологий, % | – | 40 | – |
| Количество внеплановых проверок, проведенных на основе анализа данных IIoT, шт/год | – | 50 | – |

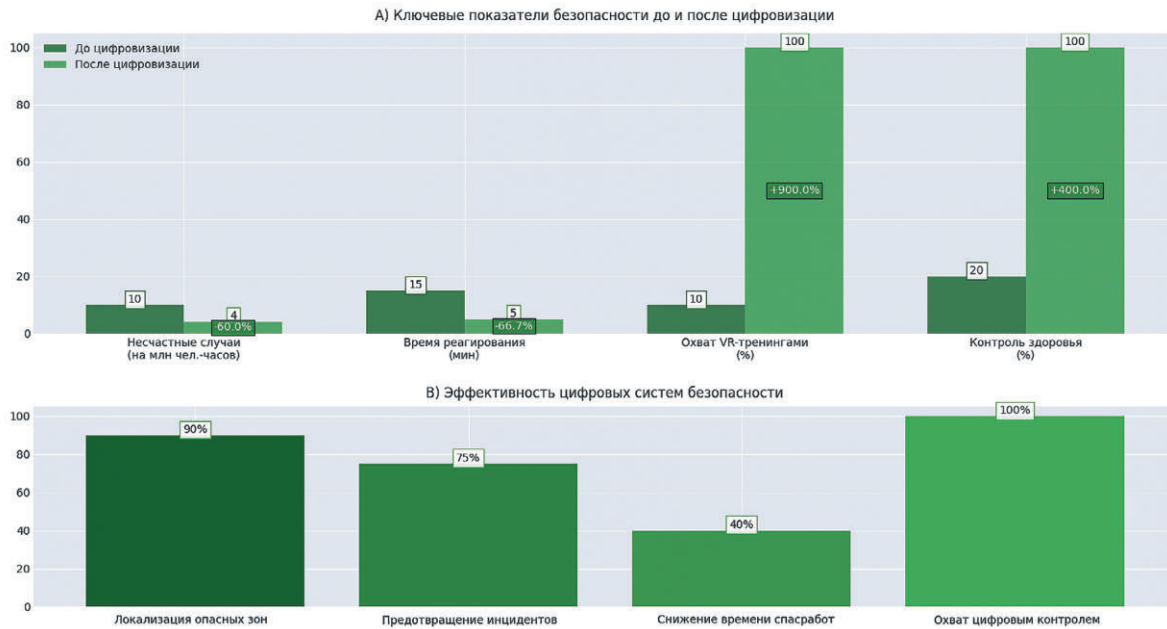


Рис. 3
Трансформация показателей промышленной безопасности при добыче лития

Fig. 3
Transformation of industrial safety indicators in lithium mining

Таблица 7
Показатели обучения и адаптации персонала к работе в условиях цифровизации

Table 7
Indicators of training and adaptation of personnel to work in a digitalized environment

| Показатель | До цифровизации | После цифровизации | Изменение, % |
|---|-----------------|--------------------|--------------|
| Доля сотрудников, прошедших обучение цифровым навыкам, % | 15 | 100 | +85 |
| Среднее количество часов обучения на 1 работника, ч/год | 20 | 80 | +300 |
| Уровень удовлетворенности персонала внедрением цифровых технологий, % | 40 | 85 | +45 |
| Снижение ошибок в работе после прохождения VR-тренингов, % | – | 50 | – |
| Количество реализованных проектов по оптимизации от сотрудников, шт/год | 5 | 30 | +500 |
| Доля операций, выполняемых с использованием цифровых инструментов, % | 20 | 75 | +55 |
| Прирост производительности труда за счет цифровизации, % | – | 25 | – |
| Доля сотрудников, вовлеченных в программы наставничества и обмена опытом, % | 10 | 60 | +50 |

ности в корпоративном обучении позволило вдвое снизить количество ошибок в работе. Благодаря вовлечению сотрудников в процессы цифровизации количество реализованных проектов по оптимизации производства от полевого персонала выросло в 6 раз (с 5 до 30 в год). Доля операций, выполняемых с применением цифровых инструментов, увеличилась на 55% и составила 75%. В результате прирост производительности труда за счет цифровизации достиг 25%. В программы наставничества и обмена лучшими практиками вовлечены 60% сотрудников (+50% к уровню до цифровизации) [16].

Ключевой задачей исследования выступала разработка целостной архитектуры цифровой системы управления процессами добычи и обогащения лития, обеспечивающей оперативную интеграцию данных и приложений (табл. 8).

Разработанная архитектура охватывает 90% процессов добычи и обогащения лития и базируется на микросервисном подходе. Используемая шина данных обеспечивает интеграцию свыше 200 различных источников инфор-

мации (датчиков, систем, баз данных) в единое цифровое пространство предприятия. Платформа бизнес-аналитики позволяет в автоматическом режиме формировать порядка 50 аналитических дашбордов и отчетов для принятия управленческих решений [8–11]. При этом среднее время выполнения пользовательских запросов на выгрузку данных составляет 3 с.

Цифровая система управляет 85% задач планирования и диспетчеризации горных работ. Около 70% типовых управленческих решений выполняется с помощью цифровых ассистентов, использующих методы Process Mining. Применение предиктивных моделей и оптимизационных алгоритмов обеспечивает сокращение времени принятия решений на 40%.

Проведенный аудит информационной безопасности показал, что уровень защищенности цифровой платформы по стандарту ISO/IEC 27001 достигает 95%. В целом полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности разработанной архитектуры цифрового управления литиевыми месторождениями. Внедрение распределен-

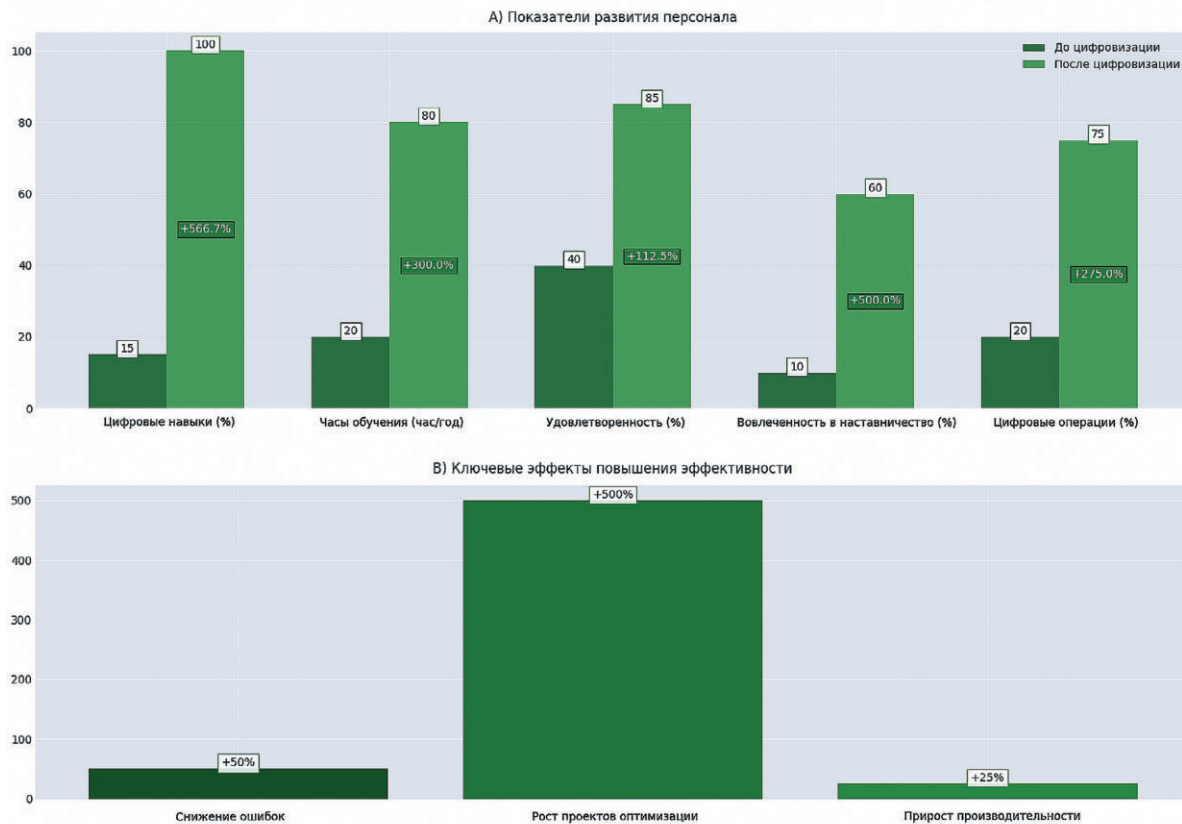


Рис. 4 Развитие человеческого капитала в условиях цифровизации

Fig. 4 Human capital development in the context of digitalization

Таблица 8
оказатели интеграции
цифровых технологий
с производственными
процессами

Table 8
Indicators of integration
of digital technologies
with production processes

| Показатель | Значение |
|--|----------|
| Доля процессов добычи и обогащения, охваченных цифровой системой управления, % | 90 |
| Количество аналитических дашбордов и отчетов, формируемых в автоматическом режиме, шт. | 50 |
| Среднее время выполнения запросов пользователей на выгрузку данных, с | 3 |
| Уровень автоматизации процессов планирования и диспетчеризации горных работ, % | 85 |
| Количество интегрированных источников данных в единое информационное пространство, шт. | 200 |
| Доля типовых управленческих решений, выполняемых с помощью цифровых помощников, % | 70 |
| Сокращение времени принятия решений за счет предиктивных моделей и алгоритмов, % | 40 |
| Уровень кибербезопасности цифровой системы управления по стандарту ISO/IEC 27001, % | 95 |

ных систем на базе промышленного интернета вещей, больших данных и искусственного интеллекта обеспечивает рост производительности, безопасности и экологичности добычи¹ [17–20].

¹ Стратегия развития промышленных редких и редкоземельных металлов на период до 2035 года. Режим доступа: https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_otrasli_redkih_i_redkozemelnyh_metallov_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2035_goda (дата обращения: 20.01.2025).

Комплексный подход к цифровизации, учитывающий не только технологические, но и организационные, социальные и экологические факторы, создает предпосылки для устойчивого развития литейной отрасли России в условиях четвертой промышленной революции.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность интеграции цифровых технологий и распределенных систем управления для оптимизации добычи лития в России. Внедрение элементов Industry 4.0 позволило повысить выход товарного лития на 19,5%, снизить затраты на добычу и обогащение на 25%, сократить время выполнения операций на 20%. При этом достигнуто уменьшение углеродного следа предприятий на 23,5% и рост уровня безопасности труда на 60%.

Комплексная цифровизация производственных и управленческих процессов на базе промышленного интернета вещей, больших данных и искусственного интеллекта создала предпосылки для перехода к интеллектуальному горному предприятию. Разработанная архитектура цифровой платформы обеспечила интеграцию свыше 200 источников данных и автоматизацию 85% задач планирования и диспетчеризации. Применение предиктивной аналитики позволило на 40% сократить время принятия решений и на 30% снизить количество внеплановых простоев оборудования.

Полученные результаты вносят вклад в развитие теории устойчивого недропользования в условиях четвертой промышленной революции. Они углубляют понимание синергетических эффектов конвергенции киберфизических систем, распределенных вычислений и аналитики данных

в горнодобывающей отрасли. Предложенный методологический подход и разработанная архитектура цифровой платформы могут быть адаптированы для других редкоземельных месторождений, способствуя повышению конкурентоспособности минерально-сырьевого комплекса России на глобальном рынке.

Направления дальнейших исследований связаны с развитием самообучающихся цифровых двойников месторождений, интегрирующих геологические, технологиче-

ские и экономические модели в единый программный комплекс. Это позволит перейти от дискретной оптимизации отдельных процессов к системной координации всей цепочки создания ценности – от геологоразведки до получения конечной продукции. Ключевым вызовом также является обеспечение надежной киберзащиты распределенной сети умных устройств и центров обработки данных горных предприятий.

Список литературы / References

1. Pripachkin P.V., Kudryashov N.M., Rundkvist T.V., Morozova L.N. Lithium in pegmatites of the Fennoscandian Shield and operation prospects for the Kolmozero deposit on the Kola Peninsula (Russia). *Applied Earth Science*. 2022;131(4):179–192. <https://doi.org/10.1080/25726838.2022.2089966>
2. Dessemond C., Lajoie-Leroux F., Soucy G., Laroche N., Magnan J.-F. Spodumene: The lithium market, resources and processes. *Minerals*. 2019;9(6):334. <https://doi.org/10.3390/min9060334>
3. Khoruzhy L.I., Katkov Yu.N., Khoruzhy V.I., Romanova A.A., Katkova E.A. Forming an adaptive model of interorganisational management accounting in agribusiness organisations within the context of COVID-19 spreading. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2022;9(1):195–204. Available at: https://procedia-esem.eu/pdf/issues/2022/no1/25_Khoruzhy_22.pdf (accessed: 07.02.2025).
4. Khoruzhy L.I., Katkov Yu.N., Katkova E.A., Romanova A.A., Dzhikiya M.K. Introduction of environmental monitoring for the sustainable development of the agro-industrial complex: the method of the genuine savings index. *Journal of Law and Sustainable Development*. 2023;11(5):471.
5. Khoruzhy L.I., Katkov Yu.N., Khoruzhy V.I., Romanova A.A. Model of a cybernetic internal control system for provisioning inter-organisational management accounting of agricultural organisations. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2022;9(1):257–266. Available at: https://procedia-esem.eu/pdf/issues/2022/no1/31_Khoruzhy_22.pdf (accessed: 07.02.2025).
6. Khoruzhy L.I., Katkov Y.N., Khoruzhy V.I., Romanova A.A., Katkova E.A. Reporting system in the adaptive accounting and analytical system of providing inter-organizational collaboration of AIC organizations. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2442(1):020014. <https://doi.org/10.1063/5.0075800>
7. Romanova A. A conceptual model for the implementation of an active adaptive information and analytical system in the contour of self-organizational management systems. *Journal of Lifestyle and SDG'S Review*. 2025;5(2):e04042. <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n02.pe04042>
8. Михеева Е.Д., Егоров Я.А. К вопросу о содержаниях лития и попутных компонентов в подземных водах перспективных площадей территории России. *Недропользование XXI век*. 2022;(2):29–35. Режим доступа: <https://nedra21.ru/archive/165/3083/> (дата обращения: 07.02.2025).
Miheeva E.D., Egorov Y.A. To the question of the content of lithium and associated components in groundwater of promising areas the territory Russia. *Nedropolzovanie XXI vek*. 2022;(2):29–35. (In Russ.) Available at: <https://nedra21.ru/archive/165/3083/> (accessed: 07.02.2025).
9. Морачевский А.Г., Попович А.А., Демидов А.И. Перспективные анодные материалы для натрий-ионных аккумуляторов. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018;24(4):185–195. <https://doi.org/10.18721/JEST.24418>
Morachevskiy A.G., Popovich A.A., Demidov A.I. Promising anode materials for sodium-ion batteries. *St. Petersburg State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2018;24(4):185–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.18721/JEST.24418>
10. Морозова Л.Н., Базай А.В. Сподумен из редкометалльных пегматитов Колмозерского литиевого месторождения (Кольский полуостров). *Записки Российского минералогического общества*. 2019;148(1):65–78. <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1481.06>
Morozova L.N., Bazai A.V. Spodumene from rare-metal pegmatites of the Kolmozerskoe lithium deposit (Kola peninsula). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2019;148(1):65–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1481.06>
11. Романова А.А., Забайкин Ю.В. Методика развития эффективно-ориентированных трудовых отношений в производственных организациях: комплексный подход. *Уголь*. 2024;(12):79–88. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=202412079> (дата обращения: 07.02.2025).
Romanova A.A., Zabaikin Yu.V. Methodology for the development of effectively-oriented labor relations in industrial organizations: an integrated approach. *Ugol'*. 2024;(12):79–88. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=202412079> (accessed: 07.02.2025).
12. Khoruzhiy L., Romanova A. Control in the inter-organizational management accounting system. *E3S Web of Conferences*. 2020;222:01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022201008>

13. Антипин В.С., Одгэрэл Д., Гэрэл О., Перепелов А.Б., Куц Л.В., Шептякова Н.В. Петрогенетические и минералого-геохимические особенности редкометалльных литий-фтористых гранитов в разновозрастных ареалах магматизма Центральной Азии (Прибайкалье, Забайкалье, Монголия). В кн.: *Петрология и геодинамика геологических процессов: материалы 13-го Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых), г. Иркутск, 6–13 сентября 2021 г.* Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; 2021. Т. 1. С. 36–39.
14. Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Литий: ресурсы, добыча и перспективы развития мирового рынка. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2018;(10-12):70–81. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.10-12.070-081>
Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P. Lithium: Resources, production and prospects of world market development. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2018;(10-12):70–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.10-12.070-081>
15. Лымарь В.К., Белоусова Е.Б. Мировой рынок литиевого сырья и соединений лития. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2021;(1-6):116–118.
Lymar V.K., Belousova E.B. World market of lithium raw materials and lithium compounds. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2021;(1-6):116–118. (In Russ.)
16. Максименко Д.Ф., Воронин А.Ю. Задачи и проблемы автоматизации процессов добычи нефти. *Форум молодых ученых*. 2019;(1-2):679–684.
Maksimenco D.F., Voronin A.Y. Tasks and problems of automation of oil production process. *Forum Molodykh Uchenykh*. 2019;(1-2):679–684. (In Russ.)
17. Серегина А.А. Обеспечение энергоперехода редкими и редкоземельными металлами. *Инновации и инвестиции*. 2021;(9):188–195.
Seregina A.A. Providing energy transition with rare and rare earth metals. *Innovation & Investment*. 2021;(9):188–195. (In Russ.)
18. Силаев С.В., Богданов А.В. Интеллектуальные системы электроснабжения промышленных объектов на основе смарт-технологий. В кн.: *Образование: профессиональный дебют: сб. материалов 4-й Междунар. студ. науч.-практ. конф., г. Курментау, 29 ноября 2018 г.* Мелеуз: Мелеузовская городская Типография; 2018. С. 113–120.
19. Усова Т.Ю., Михеева Е.Д. Возможности расширения сырьевой базы лития за счет применения новых технологий переработки сырья. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2018;(1):73–79.
Usova T.Yu., Mikheeva E.D. Possibilities for the lithium resource base expanding through the use of new technologies for raw materials processing diamond mining industry. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2018;(1):73–79. (In Russ.)
20. Шилова Л.А., Адамцевич А.О. Интеграция цифровых технологий как ключевой фактор развития российской энергетики. *Энергетическая политика*. 2020;(9):60–73. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_9151_60
Shilova L., Adamtsevich A. The integration of digital technologies as a key factor for Russian energy developing. *Energy Policy*. 2020;(9):60–73. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_9151_60

Информация об авторах

Самарин Илья Вадимович – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ivs@gubkin.ru

Романова Анастасия Алексеевна – кандидат экономических наук, научный сотрудник научно-образовательной лаборатории перспективных технологий, Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация; доцент кафедры информатики и вычислительной техники пищевых производств, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация; магистр 1-го курса, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: romanovargaymsha@mail.ru

Information about the authors

Ilya V. Samarin – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automation of Technological Processes, Gubkin University, Moscow, Russian Federation; e-mail: ivs@gubkin.ru

Anastasia A. Romanova – Cand. Sci. (Econ.), Research Fellow at the Scientific and Educational Laboratory of the Cutting-edge Technologies, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation; Associate Professor at the Department of Informatics and Computer Engineering for Food Production, Russian Technological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russian Federation; 1st-year Master's student, Gubkin University, Moscow, Russian Federation; e-mail: romanovargaymsha@mail.ru

Article info

Received: 05.02.2025

Revised: 17.03.2025

Accepted: 24.03.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.02.2025

Поступила после рецензирования: 17.03.2025

Принята к публикации: 24.03.2025