Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-118-126

Теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий

Ю.В. Забайкин[1]✉, Е.В. Красавина[2], Лютягин[3,4], Е.В. Новикова[2], Д.А. Лунькин[3]
[1] Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
[2] Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация
[3] Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация
[4] ООО «Ансгар», г. Москва, Российская Федерация
✉ 89264154444@yandex.ru

Резюме: Исследованы теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий в парадигме «Индустрия 4.0». Актуальность задана расхождением двух процессов: физический объём валовой добавленной стоимости добычи в 2025 г. снизился на 1,7%, горно-геологические условия ухудшаются измеримо (коэффициент вскрыши ПАО «Полюс» вырос за год с 1,5 до 2,4 м³/т, себестоимость добычи угля – с 2234 до 3400 руб/т), тогда как коэффициент использования производительности карьерных экскаваторов держится на уровне 0,45–0,49 против 0,80–0,90 в рекордные месяцы. Гипотеза: в киберфизическом производстве издержки измерения перестают быть экзогенным параметром и становятся проектируемой переменной, что смещает конфигурацию внутрифирменного контроля. Цель – обосновать концептуальную модель, соединяющую неинвазивный мониторинг в реальном времени, динамическое нормирование труда и минимизацию внутрифирменных транзакционных издержек. Методы: сравнительный анализ, контент-анализ отчётности, декомпозиционный анализ фонда времени, теоретическое моделирование. Предложена четырёхуровневая архитектура замкнутого кибернетического контура; издержки контроля разложены на измерение, мониторинг и принуждение к исполнению; введены коэффициент наблюдаемости контура и резерв проактивности. Показано, что выборочное фотохронометражное наблюдение выявляет в среднем 1,6% потерь рабочего времени против 14,0% при непрерывной регистрации того же объекта.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, проактивное управление, операционная эффективность, киберфизические системы, цифровой двойник, транзакционные издержки, неинвазивный мониторинг, динамическое нормирование труда, общая эффективность оборудования, Индустрия 4.0

Для цитирования: Забайкин Ю.В., Красавина Е.В., Лютягин Д.В., Новикова Е.В., Лунькин Д.А. Теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий. *Горная промышленность*. 2026;(5):118–126. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-118-126

Theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies

Yu.V. Zabaikin[1]✉, E.V. Krasavina[2], D.V. Lyutyagin[3,4], E.V. Novikova[2], D.A. Lunkin[3]
[1] National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
[2] Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
[3] Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation
[4] LLC ANSGAR, Moscow, Russian Federation
✉ 89264154444@yandex.ru

Abstract: The study justifies theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies within the Industry 4.0 paradigm. Its relevance is explained by a divergence between the following two processes. The physical volume of the gross value added in the Russian mining industry declined by 1.7% in 2025 with the mining and geological conditions deteriorating measurably, e.g. the stripping ratio at the Polyus Group rose from 1.5 to 2.4 m³/t in a single year, while the coal production cost grew from 2,234 to 3,400 Rubles per tonne. At the same time, the utilization capacity factor of the open-pit excavators remains at 0.45–0.49 against 0.80–0.90 in the record-high months. A hypothesis is made that in the cyber-physical production the measurement costs cease to be an exogenous parameter and become a design variable,

which shifts the whole configuration of the in-company control. The objective is to justify a conceptual model combining non-invasive real-time monitoring, dynamic labour rate setting and minimisation of the in-house transaction costs. The methods used include comparative analysis, content analysis of corporate reporting, decomposition of the equipment time fund and theoretical modelling. A four-level closed cybernetic control loop is proposed; control costs are decomposed into measurement, monitoring and enforcement; an observability index and a proactivity reserve are introduced. It is demonstrated that the selective photochronometry detects on average 1.6% of working time losses against 14.0% when recorded continuously at the same facility.

Keywords: mining company, proactive management, operational efficiency, cyber-physical systems, digital twin, transaction costs, non-invasive monitoring, dynamic labour rate setting, overall equipment efficiency, Industry 4.0

For citation: Zabaikin Yu.V., Krasavina E.V., Lyutyagin D.V., Novikova E.V., Lunkin D.A. Theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):118–126. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-118-126

Введение

Добывающая промышленность даёт около 12% валовой добавленной стоимости страны, но в 2024 г. её добавленная стоимость в текущих ценах достигла 22 455 млрд руб. при физическом объёме 99,5% к предыдущему году, а в 2025 г. физический объём снизился ещё на 1,7%. Горно-геологические условия ухудшаются измеримо: у ПАО «Полюс» коэффициент вскрыши вырос за год с 1,5 до 2,4 м³/т, содержание золота на Олимпиаде упало на 35%, денежная себестоимость – с 383 до 739 долл. за унцию; выход железорудного концентрата за пять лет снизился с 32,5 до 31,7%; себестоимость добычи угля выросла с 2234 руб/т в 2023 г. до 3400 руб/т в 2025 г. при убытке сегмента около 360 млрд руб. и 71% убыточных предприятий. Кроме капитальных вложений и сокращения затрат есть третий резерв – в самом контуре управления.

Нормирование труда и планово-предупредительный ремонт предполагают условия, стабильные настолько, чтобы норму и межремонтный интервал задать заранее; в горном деле это допущение ломается о стохастичность условий, распределённость подвижных активов и жёсткую сцепку переделов. Коэффициент использования производительности карьерных экскаваторов держится на уровне 0,45–0,49 против 0,80–0,90 в рекордные месяцы [1], очистных комбайнов – около 50%. Разрыв объясняет наблюдение на промышленном предприятии Урала: фотохронометраж дал 1,6% потерь рабочего времени ремонтников, непрерывное видеонаблюдение – 14,0% [2]. Дискретное наблюдение не видит коротких потерь, и управление получает картину, очищенную от того, чем должно управлять.

Цифровой контур отрасли перекошен: интернет вещей используют 10,8% организаций добычи против 8,7% по экономике, технологии искусственного интеллекта – 2,1% против 4,8% [3]; цифровые технологии применяют все компании, но 81% – фрагментарно. Научная проблема – разрыв между детерминированными моделями управления и стохастической средой, закрываемый не отчётностью, а сменой принципа наблюдения. Цель работы – обосновать концептуальную модель проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающего предприятия, соединяющую неинвазивный мониторинг в реальном времени, динамическое распределение ресурсов и минимизацию внутрифирменных транзакционных издержек. Гипотезы: непрерывная регистрация параметров оборудования переводит контур управления из реактивного режима в предиктивный, а единый информационный контур снижает внутрифирменные транзакционные издержки.

Теоретические аспекты управления факторами производства

Экономическая теория объясняет фирму экономией на издержках рыночной координации [4], но цену самой иерархии Коуз оставил за скобками. Алчиан и Демсец вывели из дороговизны наблюдения предельного продукта фигуру надсмотрщика, чья функция сводится к измерению [5]; Барзель показал, что чем дороже измерить атрибут блага, тем больше ценности рассеивается [6]; Дженсен и Меклинг разложили агентские издержки на мониторинг, гарантии и остаточные потери [7]. Общая посылка: стоимость измерения задана извне. Горное предприятие по Уильямсону предельно специфично по активам, частоте транзакций и неопределённости [8], но цена иерархии здесь высока физически: наблюдение за рассредоточенным подвижным объектом дискретно, запаздывает и стоит времени наблюдателя.

Модель различает три компоненты издержек контроля: издержки измерения T1 – перевод физического события в учётную запись (традиционный ответ – выборочный хронометраж); издержки мониторинга T2 – снятие асимметрии информации о состоянии активов и ходе заданий; издержки принуждения к исполнению T3 – проверяемость факта работы, без которой остаётся пространство оппортунизма: микропростои, приписки, работа «на диспетчера». Ключевой тезис: в киберфизическом производстве издержки измерения из экзогенного параметра становятся проектируемой переменной; меняется не интенсивность контроля, а его себестоимость. Инженерная традиция – архитектура киберфизических систем «Индустрии 4.0» [9], цифровой двойник, показатель OEE Накадзимы [10] – сводит смысл мониторинга к экономии на ремонтах; экономическая принимает издержки измерения как данность: работы о транзакционных издержках в цифровой экономике рассуждают о платформах [11; 12], цифровой мониторинг труда изучается в рамке алгоритмического контроля [13]. Приложений транзакционной оптики к промышленному IoT-мониторингу в литературе не обнаружено; этот разрыв статья и закрывает.

Материалы и методы

Работа теоретическая: вклад состоит в построении концептуальной модели и формализации условия её применимости. Эмпирическая база: статистика Росстата и ЕМИСС по разделу B ОКВЭД; статистика цифровизации ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [3]; материалы Минэнерго России, ЦДУ ТЭК и Ростехнадзора; корпоративная отчётность по про-

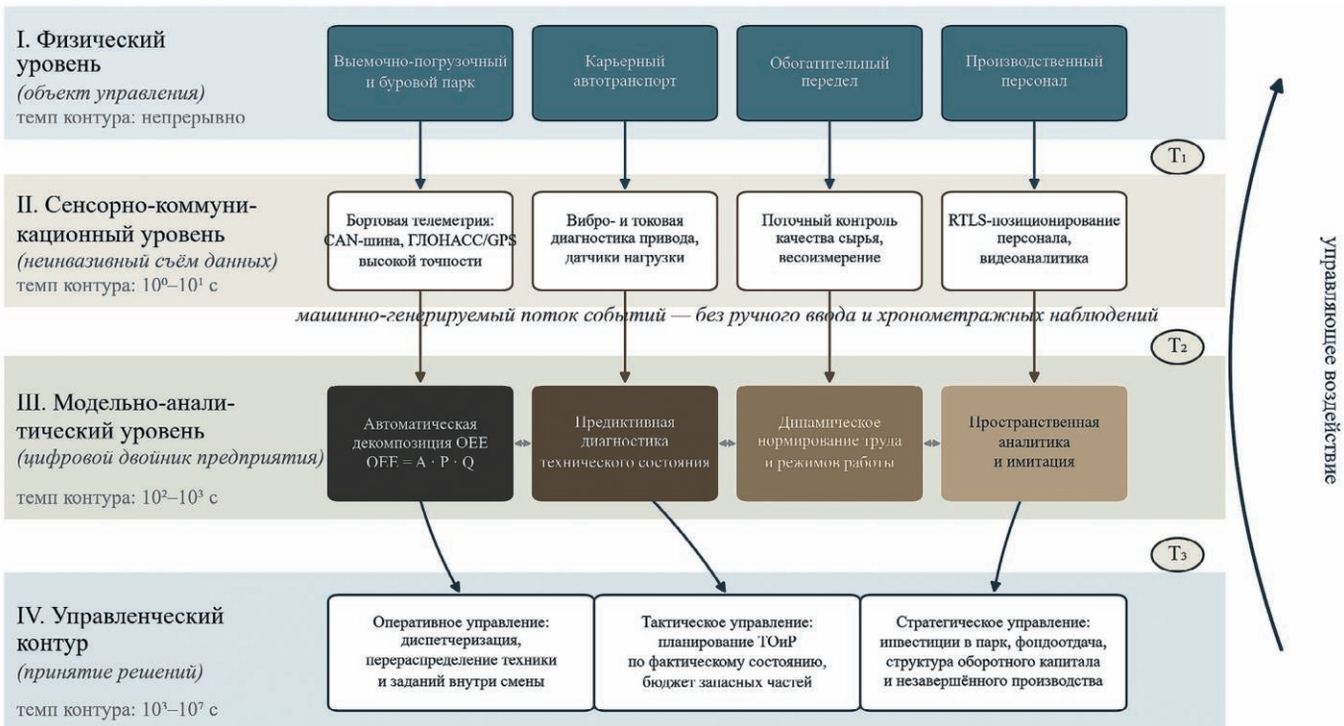


Рис. 1
Архитектура замкнутого кибернетического контура проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающего предприятия:
T_1 – точка сокращения издержек измерения: выборочное наблюдение замещается сплошной регистрацией;
T_2 – точка сокращения издержек мониторинга: снимается асимметрия информации о состоянии активов и ходе исполнения заданий;
T_3 – точка сокращения издержек принуждения к исполнению: верифицируемость факта работы сужает пространство оппортунизма

Fig. 1
Architecture of the closed-loop cybernetic system for proactive management of a mining company's operational efficiency:
T_1 – a point to cut the measurement costs: selective monitoring is replaced by continuous recording;
T_2 – a point to cut the monitoring costs: information asymmetry is removed regarding the status of assets and the progress of task execution;
T_3 – a point to cut the enforcement costs: the ability to verify work performance reduces the scope for opportunism

ектам цифровизации; федеральные нормы и правила промышленной безопасности[1], методические рекомендации по нормированию труда[2], единые нормы выработки на открытые горные работы; руководство Министерства энергетики США по эксплуатации и обслуживанию [14] и обзоры по предиктивному обслуживанию и цифровым двойникам в горном деле [15; 16]. Методы – сравнительный анализ, контент-анализ корпоративных раскрытий, декомпозиция фонда времени, теоретическое моделирование; аппарат – OEE, коэффициент наблюдаемости, резерв проактивности. Ограничения: эффекты внедрений не аудированы, величины разных обследований сопоставимы условно, статистика фиксирует применение технологии, а не глубину её встроенности в управление.

Методологические основы концепции проактивного управления

Архитектура (рис. 1) разводит уровни управления по темпу обращения: физический (техника, транспорт, обогащение, персонал); сенсорно-коммуникационный, снимающий состояние без участия человека; модельно-аналитический – цифровой двойник, превращающий поток событий в оценки [16; 17]; управленческий с внутрисменным, ремонтно-тактическим и инвестиционным горизонтами. Между уровнями нет ручного ввода: отчётность не составляется, а вычисляется, и это меняет её экономическую природу.

Закон необходимого разнообразия [18] даёт условие по времени: контур компенсирует возмущение, когда его запаздывание меньше характерного времени возмущения:

$$\tau_к < \tau_в, \quad (1)$$

где $\tau_к$ – характерное запаздывание контура управления от возникновения события до управляющего воздействия, с; $\tau_в$ – характерное время возмущения, с.

Отношение этих величин свёрнуто в резерв проактивности

$$П = 1 - \tau_к / \tau_в, \quad (2)$$

где $П$ – резерв проактивности, доли ед. При $П > 0$ контур успевает вмешаться, пока возмущение ещё действует; при $П \le 0$ возмущение отрабатывается постфактум, и управление сводится к учёту уже понесённых потерь.

Возмущения длительностью в минуты невидимы для суточного контура не потому, что плохо измеряются, а пото-

1 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 №507: зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 18.12.2020, рег. №61587. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372172/ (дата обращения: 21.07.2026).

2 Об утверждении методических рекомендаций по разработке систем нормирования труда в государственных (муниципальных) учреждениях: приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 30.09.2013 №504. Режим доступа: https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/145 (дата обращения: 21.07.2026).

Таблица 1
Индикаторы состояния и цифровизации добывающей промышленности Российской Федерации, 2022–2025 гг.

Table 1
Indicators of the state and digitalization of the mining industry in the Russian Federation, 2022–2025

Показатель		2022	2023	2024	2025
1	Индекс физического объёма валовой добавленной стоимости добычи полезных ископаемых, % к предыдущему году	100,9	98,2	99,5	98,3*
2	Валовая добавленная стоимость добычи полезных ископаемых в текущих ценах, млрд руб.	18 968,6	18 703,7	22 455,0	18 647,6*
3	Доля добычи полезных ископаемых в валовой добавленной стоимости экономики, %	13,3	11,8	12,1	9,5*
4	Выход железорудного концентрата на 1 т сырой руды, %	32,1	31,7	31,3	31,7
5	Затраты организаций добычи полезных ископаемых на цифровые технологии, млрд руб.	81,3	89,9	107,5	–**
6	Доля отрасли в затратах организаций экономики на цифровые технологии, %	2,17	2,22	2,05	–**

Примечание: строки 1–3 – данные Росстата; строка 4 – расчёт авторов по данным Росстата (коды ОКПД2 07.10.10.110 и 07.10.10.130), колебания в 0,2–0,4 пп трендом не являются; строки 5–6 – расчёты ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [3] по кругу крупных и средних организаций, строка 6 – отношение затрат раздела B к затратам всех видов деятельности; * первая оценка; ** данные не опубликованы.
Note: Rows 1–3 – Rosstat data; Row 4 – authors' calculation based on Rosstat data (OKPD2 codes 07.10.10.110 and 07.10.10.130), fluctuations within 0.2–0.4 percentage points are not a trend; Rows 5–6 – calculations by the Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, HSE University [3] for large and medium-sized companies, Row 6 – the ratio of the costs in Section B to the costs of all types of activities; * preliminary estimate; ** data not published.

му, что лежат ниже его разрешающей способности; предел физический, а не организационный.

Показатель общей эффективности оборудования [10] записывается произведением

$$\text{OEE} = A \cdot P \cdot Q, \quad (3)$$

где A – коэффициент готовности; P – коэффициент производительности; Q – коэффициент качества.

В обрабатывающей промышленности эталоном считают около 85% [19]; для карьерного экскаватора расчёт по календарному фонду даёт 37% при готовности 0,50, производительности 0,85 и качестве 0,87, по загруженному времени – 44% [19]; на разрезе Soma в Турции – 17–40% у самосвалов и 13–28% у экскаваторов [20]. Показатель по сменным рапортам наследует пороки выборки: рапорт заполняет заинтересованное лицо, а короткие остановки в него не попадают. Машинный расчёт меняет статус показателя; сдвиг фиксирует коэффициент наблюдаемости контура

$$K_{\text{н}} = T_{\text{рег}} / T_{\text{кал}} \cdot 100\ \%, \quad (4)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент наблюдаемости, %; $T_{\text{рег}}$ – время, по которому имеется машинная запись состояния объекта, ч; $T_{\text{кал}}$ – календарный фонд времени, ч.

При ручном учёте $K_{\text{н}}$ ограничен долей времени, покрытой наблюдением, – отсюда разрыв между 1,6 и 14,0% выявленных потерь; при сплошной телеметрии $K_{\text{н}}$ стремится к 100%, и OEE из отчётной оценки становится управляющим сигналом.

Хронометраж – выборочное оценивание с нормативной ценой точности: для элементов операции до одной минуты нужно 20–60 замеров, для операций свыше десяти минут – 4–8[3]; ошибка нормы убывает как $\sigma/\sqrt{n}$, затраты растут линейно по n. Телеметрия делает n равным числу всех рабочих циклов парка при почти нулевых предельных затратах, и норма из точки превращается в условное распределение

$$\tau_{\text{ц}} = f(x) + \varepsilon,\ x = (L,\ i,\ k_{\text{д}},\ q_{\text{з}},\ s), \quad (5)$$

где $\tau_{\text{ц}}$ – длительность рабочего цикла, с; L – плечо откатки, м; i – приведённый уклон трассы, ‰; $k_{\text{д}}$ – характеристика состояния дорожного покрытия; $q_{\text{з}}$ – характеристика забоя, включая крепость, кусковатость и обводнённость; s – сменно-суточные условия; ε – случайная составляющая.

Факт сопоставляется не со средней нормой, а с нормой, обусловленной условиями смены; иначе премиальная система вознаграждает за лёгкий наряд и штрафует за тяжёлый: оппортунизм порождён конструкцией измерителя.

Результаты

Индикаторы отрасли и её цифрового контура сведены в табл. 1: физический объём добавленной стоимости добычи третий год подряд не растёт, доля отрасли в добавленной стоимости экономики сжалась с 13,3 до 9,5%. Затраты на цифровые технологии выросли с 81,3 до 107,5 млрд руб. за три года, но доля отрасли в общероссийских затратах на цифровизацию не сдвинулась (2,17, 2,22 и 2,05%).

Глубина проникновения технологий в 2024 г. показана в табл. 2 (цифровые двойники – 2,2% против 1,5% – есть только в срезе 2023 г. и не включены). Там, где технология обслуживает физический и сенсорный слой, добыча опережает экономику (ПО управления производством, RFID, интернет вещей); там, где нужен аналитический слой, отстаёт: по искусственному интеллекту разрыв более чем двукратный, по анализу больших данных – почти двукратный.

Отрасль научилась ставить датчики раньше и плотнее прочих, а извлекать из показаний решения – нет: 44,3% расходов на цифровые технологии уходит на программное обеспечение против 36,3% по экономике, на обучение сотрудников – 0,1%. Насколько велика невидимая для управления часть, показано в табл. 3.

Структура сменного фонда времени одного объекта (табл. 3, строка 1) показательна тем, что три метода применены к одной группе работников [2]: фотохронометраж дал 1,6% потерь, видеонаблюдение – 14,0%, система датчиков – 0,0%, поскольку относит всё неразличимое к отдыху (37,6% против 10–11% у других методов). Датчик без модельного слоя переносит потери в другую графу, а не обнаруживает их: недостроен именно модельно-аналитический уровень (табл. 2).

3 Об утверждении методических рекомендаций по разработке систем нормирования труда в государственных (муниципальных) учреждениях: приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 30.09.2013 №504. Режим доступа: https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/145 (дата обращения: 21.07.2026).

Таблица 2
Использование цифровых технологий организациями добычи полезных ископаемых в сопоставлении со средним уровнем по экономике Российской Федерации в 2024 г.

Table 2
Utilization of digital technologies by mining companies as compared to the average level for the Russian economy in 2024

Технология	Добыча полезных ископаемых, %	В среднем по экономике, %	Отношение, раз	Отклонение, пп
RFID-технологии	15,5	9,1	1,70	+6,4
ПО для управления автоматизированным производством и технологическими процессами	18,8	11,3	1,66	+7,5
Интернет вещей	10,8	8,7	1,24	+2,1
Технологии сбора, обработки и анализа больших данных	6,8	8,6	0,79	−1,8
в том числе анализ больших данных	2,7	5,3	0,51	−2,6
Цифровые платформы	17,0	21,8	0,78	−4,8
Облачные сервисы	14,2	19,5	0,73	−5,3
Технологии искусственного интеллекта	2,1	4,8	0,44	−2,7

Примечание: рассчитано по данным ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [3] (табл. 13.2 и 14.5).
Note: calculated based on data from the Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, HSE University [3] (tables 13.2 and 14.5).

Таблица 3
Использование фонда времени горного оборудования и персонала: факт, потенциал и разрешающая способность методов наблюдения

Table 3
Utilization of mining equipment and personnel: actual figures, potential, and the resolution of monitoring methods

Объект и показатель	Зарегистрированное значение	Сопоставление: эталон, потенциал или иной метод наблюдения	Метод получения данных; источник
Потери рабочего времени ремонтников цеха промышленного предприятия (Урал)	1,6% (среднее за две смены; 3,1 и 0,0% по дням)	14,0% при сплошном видеонаблюдении того же контингента; носимые датчики – 0,0%; разрыв 8,75 раза	Разовый фотохронометраж против непрерывной видеофиксации [2]
Коэффициент использования производительности экскаватора с ковшом 18–20 м³ (разрезы и ГОКи России)	0,45–0,49 (430–510 тыс. м³/мес)	Техническая производительность 874–1134 тыс. м³/мес; рекордные месяцы 0,80–0,90 (700–1020 тыс. м³/мес)	Статистика месячной выработки парка [1]
Коэффициент использования добычного оборудования подземной угледобычи РФ, 2024 г.	50% – очистные комбайны; 70% – механизированные крепи	–	Оценка Минэнерго России, методика не раскрыта*
Коэффициент технической готовности экскаватора ЭКГ с ковшом 20 м³ (ГОК)	0,75	0,90 – потенциал при устранении аварийности и нормализации сроков ремонта	Наблюдение за двумя машинами в течение года [21]
Аварийные простои ключевых узлов экскаватора, % календарного фонда	9,0	3,3–3,8 (24–27 ч/мес) – величина, закладываемая в планы предприятий	Пооперационный учёт восстановления по узлам [21]
Затраты времени на ТОиР экскаватора, ч/мес	136	82 – план комбината; 70 – норматив сервисной компании	Факт против плана за январь – апрель [21]
Время у забоя за смену, подземная добыча (платиновый рудник, ЮАР)	≈7 ч	10 ч – номинальная смена; путь к забою 30–40 мин, на удалённых горизонтах до 2 ч	Сменные графики, интервью, наблюдение [22]

Примечание: * доклад Минэнерго России о реализации в 2025 г. Программы развития угольной промышленности России до 2035 г. (https://minenergo.gov.ru/upload2/iblock/5ad/Doklal-ME-v-MER-o-khode-realizatsii-v-2025-godu-PRUP_2035_28.05.2026_DI_10265_12.pdf); строка 1 – не горное производство, наблюдения разнесены во времени; строка 2 – использование производительности, а не времени; строки 4–6 – два экскаватора одного комбината, 0,90 и 3,3–3,8% – расчётно-нормативные величины.
Note: * report of the Ministry of Energy of Russia on the implementation of the Russian Coal Industry Development Program until 2035 in 2025 (https://minenergo.gov.ru/upload2/iblock/5ad/Doklal-ME-v-MER-o-khode-realizatsii-v-2025-godu-PRUP_2035_28.05.2026_DI_10265_12.pdf); Row 1 is not a mining operation, the observations were taken at different times; Row 2 – utilization capacity factor, not utilization over time; Rows 4–6 – two excavators at the same plant, 0.90 and 3.3–3.8% are calculated and normative values.

На технике тот же разрыв виден в каскаде потерь (табл. 3, строки 4–6): из 720 ч месячного фонда экскаватора ЭКГ плановое обслуживание по нормативу забирает 70 ч [21], превышение факта над нормативом – ещё 66,5 ч, аварийные отказы – 65 ч; готовность 0,75 при потенциале 0,90. В средней программе ТОиР реактивный ремонт занимает свыше 55% работ, у лучших предприятий – менее 10% при доле обслуживания по состоянию 45–55% (табл. 5) [14], что подтверждают и оценки для горного оборудования [15; 23].

Документированные внедрения собраны в табл. 4. Подтверждёнными считаются величины, раскрытые компаниями; оценки поставщиков (ЕВРАЗ КГОК, «Кузбассра-

Таблица 4
Документированные внедрения киберфизических систем управления на горнодобывающих предприятиях Российской Федерации и зафиксированные эффекты

Table 4
Documented implementations of the cyber-physical control systems at mining operations in the Russian Federation and the recorded effects

Предприятие, решение; год и масштаб внедрения	Зафиксированный эффект	Экономическая оценка
«Металлоинвест», Лебединский и Михайловский ГОКи – «цифровой карьер»: диспетчеризация ГТК, цифровое управление бурением (к апрелю 2024 г.; два ГОКа; вложения более 330 млн руб.)	Производительность ГТК +11%; буровых станков не менее +20%	Накопленный эффект более 1,5 млрд руб. (обе величины – нижние границы)
ЕВРАЗ – портфель цифровой трансформации: диспетчеризация, ИИ-советчики, удалённое управление агрегатами (2024 г.; более 100 проектов, свыше 100 тыс. измеряемых показателей)	Около 60% эффекта дали инициативы с применением ИИ	Подтверждённый эффект 5,8 млрд руб. за год по группе, включая металлургический передел
ЕВРАЗ КГОК – модуль «Геометаллургия» (ГК «Цифра») (май 2026 г.; карьерный ГТК комбината)	Оптимизация маршрутов техники: +8% производительности	Не раскрыта; величина заявлена поставщиком
УК «Кузбассразрезуголь» – АСУ ГТК «Карьер» (ВИСТ Групп / ГК «Цифра») (2021 г. – Бачатский разрез; к 2022 г. – 6 разрезов, свыше 1000 единиц техники)	Загрузка самосвалов +10%, производительность единицы техники +3–4%; по данным поставщика – аварийные простои до −50%, нагрузка фабрики до +5%	1,8 млрд руб. от опции контроля загрузки самосвалов (оценка поставщика)
Распадская угольная компания (ЕВРАЗ) – «Шахта GO»: аналитика перемещений персонала под землёй (пилот 2020–2021 гг.; 5 шахт в 2022 г.)	17% сотрудников опаздывали на смену; удовлетворённость доставкой +10%	Вложений не потребовалось: имеющееся оборудование позиционирования
«Норникель», Заполярный дивизион – беспилотные шахтные самосвалы на руднике «Скалистый»; позиционирование персонала (самосвалы – с 2021 г., 2 машины, горизонт 850 м, откатка свыше 3 км; позиционирование – 2024 г., 5 рудников)	+1,5 ч работы в сутки и 4–6 дополнительных циклов; объём горной массы +1%	21 тыс. т в год при базе 2,1 млн т; денежный эффект не раскрыт
«Северсталь», Яковлевский ГОК – компьютерное зрение для контроля состояния рудоспусков (I полугодие 2025 г.; подземный рудник)	Предотвращено 19,3 ч простоев	2,9 млн руб. за полугодие
Разрез «Изыхский» (Хакасия) – два роботизированных самосвала БЕЛАЗ-7513R (испытания с 2018–2019 гг.; 2 × 130 т, участок 1350 м)	Сменная норма выработки превышена на 20%	Не раскрыта
АО «Апатит» (ФосАгро), Кировский рудник – дистанционное управление буровыми установками Simba M6S (2021 г.; один оператор ведёт бурение на шести машинах)	Производительность труда на руднике +20%	Не раскрыта

Источник: составлено авторами по корпоративным раскрытиям и отраслевым публикациям 2019–2026 гг.
Source: compiled by the authors based on corporate disclosures and industry publications from 2019–2026.

зрезуголь») не аудированы; эффект ЕВРАЗа получен по группе целиком, включая металлургию; финансирование ИТ «Норникеля» в 2024 г. (8,7 млрд руб. на 119 проектов) характеризует затраты, а не эффект; отбор смещён к успешным проектам. Показателен кейс без вложений: «Шахта GO» на уже установленном оборудовании позиционирования выявила, что 17% сотрудников опаздывали на смену.

Свойства трёх контуров управления сопоставлены в табл. 5; величины из разных обследований сопоставимы условно.

Граница между контурами качественная. Проактивный контур меняет разрешающую способность: обновление данных о местоположении в многофункциональной системе безопасности угольной шахты ограничено пятью секундами при разрешении около трёх метров (табл. 5) – на четыре-пять порядков быстрее сменного рапорта. Удельные затраты на ТОиР падают с 18 долл. на л. с. в год при реактивном ремонте до 13, 9 и 6 при планово-предупредительном, по состоянию и надёжностно-ориентированном, а доминирующие издержки контроля смещаются от принуждения к измерению и далее к верификации моделей.

Обсуждение результатов

Материал разводит три компоненты издержек контроля по наблюдаемым следам. Издержки измерения падают там, где выборку замещает сплошная регистрация: разрыв 1,6 и 14,0% – прямая мера ценности, рассеивавшейся из-за дороговизны измерения [6]. Издержки мониторинга падают вместе с асимметрией информации о состоянии активов: управляющий перестаёт узнавать об отказе от отказа

Таблица 5
Сопоставление контуров управления операционной эффективностью горнодобывающего предприятия: реактивный, планово-предупредительный и проактивный

Table 5
A comparison of the control loops for operational efficiency in mining companies: reactive, schedule preventive, and proactive

Критерий сопоставления	Реактивный контур	Планово-предупредительный контур	Проактивный контур
Шаг регистрации и запаздывание воздействия	Шаг – момент отказа, запаздывание – длительность неплановой остановки	Шаг – межремонтный интервал (в модельном карьере на ТОиР отведено 50 из 350 плановых суток)	Секунды: обновление данных о местоположении в МФСБ угольной шахты не более 5 с, разрешение до (3 ± 1) м (базовый метод RSSI – ±20 м)
Доля в программе ТОиР: промышленность США / постоянно лучшие предприятия, %	более 55 / менее 10	31 / 25–35	12 / 45–55
Удельные затраты на ТОиР, долл. на 1 л. с установленной мощности в год	18	13	9 – обслуживание по состоянию; 6 – надёжностно-ориентированное ТОиР
Приростный эффект по затратам и готовности	База сопоставления; неплановые простои не бюджетируются	Экономия 12–18% затрат на ТОиР относительно реактивного контура	Экономия 8–12% относительно планово-предупредительного, суммарно свыше 30–40%; простои −35…45%, затраты −25…30%, выпуск +20…25% (DOE); готовность +10…20% (Deloitte)
Доминирующие транзакционные издержки контроля	Принуждение к исполнению: установление ответственного и разбор отказа	Измерение: наблюдение выборочно и дискретно (1,6% потерь по фотохронометражу против 14,0% при видеонаблюдении)	Измерение капитализировано в инфраструктуру, предельные издержки наблюдения близки к нулю; вес смещается к верификации моделей

Источник: структура программы ТОиР, удельные затраты и приростная экономия – [14, гл. 5]; оценки готовности оборудования – материалы Deloitte по предиктивному обслуживанию; период обновления данных о местоположении персонала – п. 22 приказа Ростехнадзора от 08.12.2020 N°507.
Source: the structure of a maintenance program, unit costs, and incremental savings – [14, Ch. 5]; equipment availability assessments – Deloitte materials on predictive maintenance; the update interval of personnel location data – Clause 22 of Rostechnadzor Order No.507 dated December 8, 2020.

[14]. Издержки принуждения падают последними: когда факт работы верифицируем, исчезает не только приписка, но и слой процедур её проверки – логика Alchian и Demsetz [5] с обратным знаком.

Инвестиции компаний в цифровизацию не превышают 2% выручки при фрагментарности у 81%: собственная ИТ-инфраструктура специфична по предприятию и технологическому поколению, а специфичность, по Williamson, порождает риск вымогательства [8]. Сервисная модель делает расход делимым и обратимым и снижает не столько стоимость цифровизации, сколько цену ошибки при входе, что решающе для убыточных предприятий угольного сегмента.

Результаты продолжают работы о транзакционных издержках в цифровой экономике [11; 12], перенося фокус на внутрифирменный уровень [24]; исследования алгоритмического контроля [13] и метаанализ электронного мониторинга производительности [25] напоминают об обратной стороне удешевления наблюдения, не изученной в горной отрасли. Модель объяснительная, а не прогностическая; дальнейшая работа – прямое измерение издержек контроля до и после перехода к сплошной регистрации и проверка условия (1) на данных диспетчерских систем.

Заключение

Исследование достраивает транзакционную теорию там, где она обрывалась: в киберфизическом производстве издержки измерения становятся проектируемой переменной, и меняется не интенсивность контроля, а его себестоимость. Условие работоспособности контура формализовано через характерные времена: резерв проактивности $П = 1 - \tau_к/\tau_в$ разделяет режимы, а короткие потери невидимы для суточного контура из-за физического предела разрешающей способности, поэтому сменный рапорт нужно не улучшать, а замещать.

Коэффициент наблюдаемости Кн связывает инженерный показатель с экономическим: при сплошной регистрации OEE становится управляющим сигналом, а норма из точки – условным распределением, что снимает встроенный источник оппортунизма. Документированные внедрения подтверждают направление без аудированной величины эффекта, а асимметрия цифрового контура указывает узкое место – способность превращать данные в решения. Управлять в стохастической среде нужно не средним, а распределением, и не отклонением от плана, а запаздыванием контура.

Список литературы / References

1. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А. Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования. *Горная промышленность*. 2023;(6):148–154. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-148-154
Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A. Searching for reserves to increase productivity of excavator-automobile complexes using computer simulation. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):148–154. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-148-154

2. Долженко Р.А., Малышев Д.С. Цифровизация подходов к организации и нормированию труда на промышленном предприятии. *Вестник Омского университета. Серия: Экономика*. 2021;19(4):54–66. https://doi.org/10.24147/1812-3988.2021.19(4).54-66
Dolzhenko R.A., Malyshev D.S. Digitalization of approaches to labor organization and rationing in the industrial enterprise. *Herald of Omsk University. Series "Economics*". 2021;19(4):54–66. (In Russ.) https://doi.org/10.24147/1812-3988.2021.19(4).54-66

3. Абашкин В.Л., Абдрахманова Г.И., Бочаров М.Я., Вишневский К.О., Гохберг Л.М., Демидкина О.В. и др. *Индикаторы цифровой экономики: 2026*. М.: ИСИЭЗ ВШЭ; 2026. 304 с. Режим доступа: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1122445658.pdf (дата обращения: 21.02.2026).

4. Coase R.H. The nature of the firm. *Economica*. 1937;4(16):386–405. https://doi.org/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x

5. Alchian A.A., Demsetz H. Production, information costs, and economic organization. American Economic Association. 1972;62(5):777–795. Режим доступа: https://www.aeaweb.org/aer/top20/62.5.777-795.pdf (дата обращения: 21.02.2026).

6. Barzel Y. Measurement cost and the organization of markets. *The Journal of Law and Economics*. 1982;*25*(1):27–48. https://doi.org/10.1086/467005

7. Jensen M.C., Meckling W.H. Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics*. 1976;*3*(4):305–360. https://doi.org/10.1016/0304-405X(76)90026-X

8. Williamson O.E. Transaction-cost economics: the governance of contractual relations. *The Journal of Law and Economics*. 1979;*22*(2):*233*–261. https://doi.org/10.1086/466942

9. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015;*3*:18–*23*. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001

10. Nakajima S. *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Cambridge, MA: Productivity Press; 1988. 129 p.

11. Nagle F., Seamans R., Tadelis S. Transaction cost economics in the digital economy: A research agenda. Strategic *Organization*. 2025;*23*(2):351–365. https://doi.org/10.1177/14761270241228674

12. Avdasheva S.B., Geliskhanov I.Z. Transaction cost economics: Lessons from past reforms and potential for the digital economy. *Russian Journal of Economics*. 2025;11(*3*):*237*–268. https://doi.org/10.32609/j.ruje.11.156897

13. Cram W.A., Wiener M., Tarafdar M., Benlian A. Examining the impact of algorithmic control on uber drivers' technostress. *Journal of Management Information Systems*. 2022;39(2):426–453. https://doi.org/10.1080/07421222.2022.2063556

14. Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P., Hunt W.D. *Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. Release* 3.0. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory; 2010. 321 p. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/04/f74/omguide_complete_w-eo-disclaimer.pdf (accessed: 21.07.2026).

15. Rojas L., Peña Á., Garcia J. AI-driven predictive maintenance in mining: a systematic literature review on fault detection, digital twins, and intelligent asset management. *Applied Sciences*. 2025;15(6):3337. https://doi.org/10.3390/app15063337

16. van Eyk L., Heyns P.S. A framework to define, design and construct digital twins in the mining industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2025;200:110805. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110805

17. Клебанов А.Ф., Еремкин И.В., Габусу П.А. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами. *Горная промышленность*. 2025;(4):61–70. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70
Klebanov A.F., Eremkin I.V., Gabusu P.A. Digital twins of control processes for highly automated mining transport complexes. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):61–70. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70

18. Ashby W.R. *An introduction to cybernetics*. New York: John Wiley & Sons; 1956. 295 p.

19. Elevli S., Elevli B. Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE. *Acta Montanistica Slovaca*. 2010;15(2):95–101. Available at: https://actamont.tuke.sk/pdf/2010/n2/1elevli.pdf (accessed: 21.07.2026).

20. Toraman S. Evaluation of overall equipment effectiveness (OEE) for mining equipment (shovel-truck): A case study Manisa-Soma (Turkey) open pit mine. *Journal of Scientific Reports-A*. 2024;(056):45–55. https://doi.org/10.59313/jsr-a.1433960

21. Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(10):86–94. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94
Shibanov D.A., Ivanov S.L., Yemelyanov A.A., Pumpur E.V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(10):86–94. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94

22. Pelders J.L., Magweregwede F., Rupprecht S.M. Optimization of shift cycles in the South African mining sector. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021;121(8):427–436. https://doi.org/10.17159/2411-9717/1428/2021

23. Харченко К.В., Зубец А.Ж., Москвитина Е.И., Бабаян Л.М., Лаффах А.М. Анализ эффективности внедрения предиктивного обслуживания горнодобывающего оборудования на основе технологий Индустрии 4.0. *Горная промышленность*. 2024;(4):130–138. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-130-138
Kharchenko K.V., Zubets A.Zh., Moskvitina E.I., Babayan L.K., Laffah A.M. Analyzing the efficiency of implementing predictive maintenance of mining equipment based on Industry 4.0 technologies. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):130–138. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-130-138

24. Meng X., Gong X. Digital transformation and innovation output of manufacturing companies – An analysis of the mediating role of internal and external transaction costs. *PLoS ONE*. 2024;19(1):e0296876. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296876

25. Ravid D.M., White J.C., Tomczak D.L., Miles A.F., Behrend T.S. A meta-analysis of the effects of electronic performance monitoring on work outcomes. *Personnel Psychology*. 2023;76(1):5–40. https://doi.org/10.1111/peps.12514

Информация об авторах
Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: 89264154444@yandex.ru
Красавина Екатерина Валерьевна – доктор социологических наук, доцент, профессор кафедры политического анализа и социально-психологических процессов, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация
Лютягин Дмитрий Владимирович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры производственного и финансового менеджмента, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация; научный руководитель ООО «Ансгар», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: lyutyagindv@mgri.ru
Новикова Екатерина Владимировна – кандидат экономических наук, доцент базовой кафедры Торгово-промышленной палаты Российской Федерации «Управление человеческими ресурсами», Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-5347-108X; e-mail: katek_ev@mail.ru
Лунькин Дмитрий Александрович – кандидат экономических наук, доцент кафедры гуманитарных наук, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4553-006X; e-mail: rabotalun@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.06.2026
Поступила после рецензирования: 22.07.2026
Принята к публикации: 28.07.2026

Information about the authors
Yury V. Zabaikin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: 89264154444@yandex.ru
Ekaterina V. Krasavina – Dr. Sci. (Sociol.), Associate Professor, Professor of the Department of Political Analysis and Socio-Psychological Processes, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
Dmitry V. Lyutyagin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production and Financial Management, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation; scientific supervisor LLC ANSGAR, Moscow, Russian Federation; e-mail: lyutyagindv@mgri.ru
Ekaterina V. Novikova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Basic Department of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation “Human Resources Management”, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5347-108X; e-mail: katek_ev@mail.ru
Dmitriy A. Lunkin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Humanities, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4553-006X; e-mail: rabotalun@yandex.ru

Article info
Received: 04.06.2026
Revised: 22.07.2026
Accepted: 28.07.2026