

ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ОТРАСЛЕЙ

Н.А. Мацко¹, М.Ю. Харитонов²

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
(ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия, e-mail: matsko@inbox.ru

² Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

Аннотация: Рассмотрены способы представления эффективности цифровых технологий в горнодобывающей промышленности. Отмечено отсутствие систематических оценок фактически достигнутых эффектов на уровне отдельных предприятий и отрасли в целом. Обоснована необходимость исследования мультифакторной производительности ресурсов и вклада в нее отдельных факторов, включая инвестиции в информационные технологии. Выполнен анализ долгосрочных тенденций изменения мультифакторной производительности на примере австралийского и российского минерально-сырьевого секторов экономики. Установлено, что в настоящее время имеется долгосрочная тенденция к снижению мультифакторной производительности. Уменьшение эффективности производственного капитала и трудовых ресурсов обусловлено по большей части неопределенностью и снижением качества природного капитала во времени, удорожанием геологоразведочных работ и снижением их результативности, ухудшением рыночных условий и циклическим характером изменения цен на минеральное сырье. Отмечено, что информационные технологии внесли существенный вклад в компенсацию негативного влияния снижения качества природного капитала на определенных промежутках времени за счет сокращения затрат на добычу и переработку минерального сырья. Однако изменить тенденцию к снижению мультифакторной производительности не удалось. Сделан вывод, что наибольшего вклада в увеличение эффективности использования ресурсов следует ожидать при создании единой системы управления производством на базе интеграции математических моделей и методов оптимизации, анализа больших данных, технологий цифровых двойников, коммуникативных технологий, систем мониторинга. Прогностический потенциал таких систем должен позволить перейти на новый уровень управления производительностью ресурсов за счет управления неопределенностью и изменчивостью параметров при разработке месторождений полезных ископаемых, а также процессом воспроизводства минерально-сырьевой базы.

Ключевые слова: мультифакторная производительность, производительность труда, производительность капитала, качество природного капитала, инвестиции в информационные технологии, цифровая трансформация, цифровые технологии, эффективность цифровых инноваций.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственных заданий: ИСА ФИЦ ИУ РАН (проект FFNG-2024-0002), ИХХТ СО РАН (проект FWES-2021-0014).

Для цитирования: Мацко Н. А., Харитонов М. Ю. Влияние цифровизации на производительность горнодобывающих отраслей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 10. – С. 153–166. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_153.

Effect of digitalization on performance of the mining industry

N.A. Matsko¹, M.Yu. Kharitonova²

¹ Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS), Moscow, Russia, e-mail: matsko@inbox.ru

² Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – a Separate Unit of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The article discusses evaluation of efficiency of digital technologies in the mining industry. The industry and its individual entities lack systematic evaluation of actual effects. It is necessary to investigate the multi-factor efficiency of resources and contribution of individual factors, including investment in information technologies. The long-term trends of change in the multi-factor efficiency is analyzed in terms of the Australian and Russian mineral resources sector of economy. It is found that the present-day long-term trend shows a decrease in the multi-factor efficiency. The efficiency reduction of the production capital and labor force is mostly governed by the uncertainty and degradation of the natural capital in the course of time, by the appreciation of geological exploration at its decreased effectiveness, by the aggravation of market environment and cycling of mineral prices. The information technologies have contributed greatly to balancing the adverse impact of the natural capital degradation over certain time spans owing to cost saving in mineral mining and processing. Nevertheless, the decreasing trend of the multi-factor efficiency yet remains. It is stated that the highest contribution to the increased efficiency of resource exploitation should be expected in case of a united system of production management within the framework of integration of mathematical models and methods of optimization, big data analysis, digital twin technologies, communication technologies and monitoring systems. The expectation-driven potential of such system should enable a next-level management of resource efficiency through the control of the uncertainty and variability of mineral mining parameters and thanks to monitoring of reproduction of mineral resources.

Key words: multi-factor efficiency, labor efficiency, capital efficiency, natural capital quality, investment in information technologies, digital transformation, digital technologies, digital innovation efficiency.

Acknowledgements: The study was carried out under state contracts with ISA RAS and ICCT SB RAS, Projects Nos. FFNG-2024-0002 and FWES-2021-0014, respectively.

For citation: Matsko N. A., Kharitonova M. Yu. Effect of digitalization on performance of the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(10):153-166. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_153.

Введение

В настоящее время перспективы развития сырьевых отраслей связывают с применением и масштабированием информационных технологий. Предполагается, что цифровые инновации в глобальном масштабе позволят получить

экономический эффект около 15,7 трлн долл. к 2030 г., не считая социальных и экологических эффектов [1, 2].

Сегодня база цифровой трансформации по большей части уже обеспечена автоматизацией производственных процессов [3]. Однако в силу своих особен-

ностей отрасль является одной из наиболее консервативных. Большинство горнодобывающих компаний в мире находится на стадии подготовки к внедрению цифровых технологий. Только 10% предприятий полностью осуществили хотя бы одно цифровое решение.

В России индекс цифровизации горнодобывающих предприятий в 2020 г. составлял 29,4, при среднем значении по предпринимательскому сектору 32,2 (Абдрахманова Г. И., Вишневский К. О., Гохберг Л. М. и др. Цифровая экономика: 2021. Краткий статистический сборник. — М.: НИУ ВШЭ, 2021. — 124 с.). В 2022 г. 26% предприятий использовали технологии анализа больших данных; 20% — облачные серверы; 17% — геоинформационные системы; 11% — цифровые платформы; 23% — ERP, 8% — SCM, 12% — CRM-системы (Абашкин В. Л., Абдрахманова Г. И., Вишневский К. О., Гохберг Л. М. и др. Цифровая экономика: 2024. Краткий статистический сборник. — М.: ИСИЭС ВШЭ, 2024. — 124 с.). В остальных случаях опыт цифровизации заключается в ее использовании на уровне отдельных процессов. Однако вектор развития направлен на формирование общей стратегии цифровой трансформации, создание ИТ-инфраструктуры, интеграцию решений в единую систему управления освоением недр [4, 5].

Сложность внедрения информационных технологий в добывающих отраслях экономики связана с рядом причин. Во-первых, это требует значительных вложений в создание и поддержание соответствующей инфраструктуры, что сокращает возможности инвестирования других направлений, например, расширения и поддержания собственной сырьевой базы. Во-вторых, не хватает квалифицированных специалистов, способных наметить стратегию цифровизации. Наконец, главный вопрос: каковы

эффекты использования цифровых технологий? Сегодня информация о прогнозной эффективности цифровых решений на горных предприятиях представлена в виде диапазонов снижения затрат, объемов используемого сырья, материалов, электроэнергии, степени повышения безопасности.

Более масштабные оценки эффектов, отражающие возможности повышения производительности используемых ресурсов, компенсации негативного влияния снижения качества природного капитала, управления неопределенностью, встречаются редко.

Целью данной статьи является анализ долгосрочных тенденций изменения производительности ресурсов, используемых в горнодобывающем производстве, оценка вклада цифровых технологий в ее повышение.

Методы

Анализ и обобщение результатов научных и отраслевых исследований в области оценки динамики производительности труда, производительности капитала, мультифакторной производительности с учетом инвестиционной деятельности по цифровизации горнодобывающей отрасли; методы экономической оценки инвестиционных решений, в том числе решений по цифровым проектам; статистический анализ технологических и экономических показателей отечественных и зарубежных минерально-сырьевых баз.

Оценка эффективности использования цифровых технологий в горнодобывающей промышленности

Цифровизация производства требует инвестиций. Экономическое обоснование целесообразности таких инвестиций является важным этапом процесса принятия решений. Анализ данных по

эффективности инвестирования в цифровую трансформацию горнодобывающей промышленности по открытым отечественным и зарубежным источникам показал, что в большинстве литературных источников встречаются либо качественные описания подразумеваемых эффектов [6, 7], либо данные о диапазонах прогнозируемых показателей снижения затрат по отдельным переделам и статьям затрат. Например, приводятся данные о повышении производительности и коэффициентов использования горнотранспортного оборудования, экономии топлива и сокращении потребления электроэнергии [8], увеличении извлечения полезных компонентов из руд, снижении расходов на реагенты, повышении производительности горной техники, повышении безопасности ведения горных работ, снижении травматизма, повышении качества и оперативности принятия управленческих решений [9–11]. Такие оценки решений по цифровизации обычно выполняются компаниями-разработчиками для конкретных условий внедрения. Интересный факт озвучили в рамках международной выставки MiningWorld Russia представители ГК «Цифра». Так, на вопрос: «Какого финансового эффекта от цифровизации вы достигли в 2023 г. относительно плана?» около половины отечественных горнодобывающих компаний, уже использующих цифровые технологии, ответили, что не достигли запланированных результатов. Среди «новичков» эта доля составила 74%. При этом ни один респондент из компаний, ведущих цифровую трансформацию, не высказал намерение снизить ожидаемый эффект.

До настоящего времени подавляющее большинство руководителей горнодобывающих предприятий рассматривают информатизацию и цифровизацию как издержки ведения бизнеса, а не как

технологии, которые могут значительно повысить производительность, трансформировать производство. Эффекты, которых они ожидают, являются скорее оперативными, приводящими к экономии эксплуатационных расходов. Этим объясняется тот факт, что в подавляющем большинстве случаев прогнозная эффективность цифровых технологий, демонстрируемых разработчиками, выражается в снижении удельных показателей себестоимости по отдельным переделам горных работ.

Так, например, предполагается, что внедрение автономных самосвалов позволит увеличить производительность на 5–10%, снизить фонд оплаты труда на добычные работы на 5–10%, снизить затраты на горюче-смазочные материалы и крупногабаритные шины на 3–5%, увеличить срок службы оборудования на 0–5% [12]. Сквозная оптимизация производства с помощью удаленных центров управления повысит производительность на 5–10%, сократит эксплуатационные затраты на 5–10%, уменьшит промежуточные запасы на 0–10%, повысит техническую готовность и надежность оборудования на 1–3%. За счет применения цифровых моделей предполагается увеличение объемов производства на 10–15%, рост скорости процессов разработки в 1,5–2 раза, сокращение расходов в результате оптимизации технологических операций на 30%, достижение роста производительности труда на 10–15% и улучшение экологической ситуации. [13]. Укрупненная оценка показала, что уменьшение себестоимости продукции от применения цифровых технологий на 0,5–6% существенно для горных предприятий, позволит недоступным на сегодняшний день запасам перейти в разряд рентабельных [14]. Для различных переделов приводятся общие оценки повышения производительности:

карьеров — на 5–15%, обогатительных фабрик — до 20%, персонала — до 50% [15]. К сожалению, из приводимых данных непонятно, о какой производительности идет речь: производительность оборудования, производительность труда или производительность предприятия (по горной массе, руде или готовой продукции)? В обзоре цифровизации горнометаллургической отрасли России, представленном в 2024 г. в рамках международной выставки MiningWorld Russia, приводятся также данные об опыте цифровизации западных и азиатских компаний горнодобывающей и металлургической отраслей. Структура вкладов различных цифровых технологий в суммарную получаемую предприятием прибыль следующая. Для западных горнодобывающих компаний только 25% прибыли обусловлено влиянием цифровизации производственных процессов, еще 17% — это эффекты цифровых решений, направленных на улучшение технического обслуживания и ремонтов. Остальная доля представлена вкладами от повышения результативности поставок, продаж и корпоративных функций. Цифровизация азиатских компаний, судя по всему, более ориентирована на производство. Структура прибыли для них характери-

зуется вкладами производства и технического обслуживания и ремонта (ТОиР), 42 и 20% соответственно.

Очень редко встречаются оценки потенциальной эффективности цифровизации горнодобывающих отраслей, выраженные приростом получаемого дохода или чистой дисконтированной стоимости проекта (5–15%) (Тимофеев А., Волков М., Могучев М., Щетинин С. Цифровое будущее горнорудного предприятия. — Boston Consulting Group Review, 2020. — 56 с.). Целесообразность подобных оценок эффективности цифровизации горнодобывающего производства вызывает сомнение. Кроме того, никакого обоснования в этих работах не приводится. Для оценки эффективности цифровизации на уровне отдельных процессов или предприятий вполне уместен приростный метод. Если же необходима оценка влияния цифровой трансформации на эффективность горнодобывающей отрасли экономики, наиболее приемлемым, на наш взгляд, показателем в этом случае является мультифакторная производительность. Далее под производительностью в статье будет пониматься именно этот показатель.

Мультифакторная производительность — показатель, характеризующий

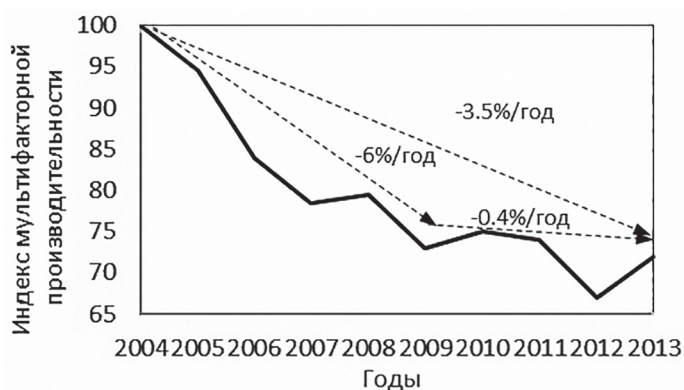


Рис. 1. Мировая динамика мультифакторной производительности в горнодобывающих отраслях
 Fig. 1. Global dynamics of multifactor productivity in mining industries

эффективность использования ресурсов, рассчитываемый как отношение объема производства к затратам ресурсов, таких как труд, капитал и материалы.

Анализ динамики мультифакторной производительности горнодобывающей промышленности

Международная консалтинговая компания McKinsey публикует данные о снижении производительности в добывающих отраслях с темпом 6% в год с 2004 по 2009 г., затем с 2009 по 2013 г. темп снижения замедлился до 0,4% в год (Durrant-Whyte H., Geraghty R., Pujol F., Sellschop R. How digital innovation can improve mining productivity // *Metals & Mining Practice*, 2015, November, 13 p.) (рис. 1).

Эти тенденции, как для мира в целом, так и для ведущих горнодобывающих стран, подтверждаются многими источниками. Причем в США, Канаде, Австралии и странах Африки темпы снижения мультифакторной производительности в период 2004—2013 гг. были выше, чем в среднем по миру и превышали 4% [16—18]. Производительность добычи полезных ископаемых в Чили снижалась с темпом около 4% в год за период 1999—2010 гг. [19]. После периода быстрого роста в начале 2000-х годов производительность в добыче угля в Казахстане стагнировала, а в добыче железной руды снизилась [20]. С 2010 г. мировой тренд сменился к росту производительности, что связывали с жестким контролем расходов. Не исключено также, что это происходило за счет перераспределения объемов добываемых открытым и подземным способами разрабатки.

Интересно отметить, что снижение мультифакторной производительности в горнодобывающих отраслях может

происходить на фоне роста цен на минеральную продукцию, капиталовооруженности и производительности труда. Причины данного явления, с одной стороны, чисто экономические: изменение цен на сырье, циклический характер инвестирования и наличие лагов между вложением капитала и его отдачей.

Спецификой горнодобывающих отраслей является то, что цены на минеральное сырье оказывают нетривиальные эффекты на мультифакторную производительность. Так, рост цен на сырье стимулирует вовлечение в разработку более бедных запасов (с увеличением, соответственно, объемов извлекаемых горных пород), что, хотя и может приводить к повышению рентабельности освоения месторождений, может сопровождаться также снижением производительности труда. Не удивительно, что в работе [21] «добыча полезных ископаемых» выделяется слабой корреляцией индекса производительности труда от индексов физического объема валовой добавленной стоимости на фоне остальных отраслей экономики. Падение цен на минеральную продукцию ведет к закрытию предприятий с высокими издержками (что должно положительно сказываться на динамике производительности), но и к уменьшению добываемых объемов на действующих предприятиях, т.е. к снижению эффективности использования капитала. Все вышеперечисленное приводит к опережающему, по сравнению с ростом производства товарной продукции, росту затрат на воспроизводство сырьевой базы, капитальное строительство, затрат на добычу и переработку минерального сырья и, соответственно, к падению мультифакторной производительности.

По существу, влияние совокупности этих факторов и отразилось на результатах работы минерально-сырьевого

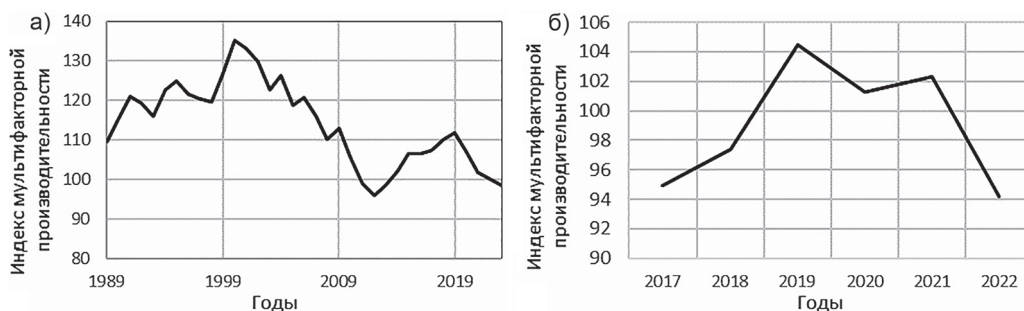


Рис. 2. Изменение мультифакторной производительности: австралийской горнодобывающей промышленности, 1989–2023 гг. (а); российской горнодобывающей промышленности, 2017–2022 гг. (б)

Fig. 2. Changes in multifactor productivity of: the Australian mining industry 1989–2023 (a); the Russian mining industry 2017–2022 (b)

комплекса. Несмотря на рост производительности в 2011–2018 гг., к концу этого периода темпы роста так и не достигли значений 15-летней давности и находились на уровне на 25% ниже, чем в середине 2000-х гг. Кроме того, судя по некоторым данным, с 2021–2022 гг. спад производительности возобновился (Rossouw A. Mine 2024: Preparing for impact. PWC, 2024, 39 p.).

На рис. 2 показано изменение многофакторной производительности австралийского (рис. 2, а) (Australian Bureau of Statistics. URL: <https://www.abs.gov.au/statistics>.) и российского (рис. 2, б) (Федеральная служба государственной статистики РФ (Росстат). URL: <https://rosstat.gov.ru/>) (для более короткого интервала времени) добывающих секторов экономики. Можно видеть, что тенденции в соответствующие периоды очень похожи и вполне соответствуют общемировым трендам.

Представляется чрезвычайно важным оценить значимость факторов, влияющих на производительность, включая затраты на цифровизацию, и исследовать ее динамику в долгосрочной перспективе. К сожалению, из-за отсутствия исходных данных выполнить такой анализ для отечественной добывающей отрасли не представляется возможным. Но можно проследить динамику вклада

используемых в процессе производства ресурсов, в том числе инвестиций в информационные технологии, в мультифакторную производительность, на примере австралийской горнодобывающей отрасли. Австралийский пример представляет особый интерес в рамках рассматриваемой проблемы, поскольку эта страна является одним из мировых лидеров в области цифровой трансформации горнодобывающей промышленности. К тому же в открытом доступе имеются статистические данные, позволяющие сделать некоторые выводы о влиянии цифровизации отрасли на эффективность ее функционирования.

Факторы, влияющие на мультифакторную производительность

В целом на динамику производительности горнодобывающего производства влияет большое количество факторов. К ним относятся: исходное качество природного капитала, степень истощения сырьевой базы, снижение содержания полезных компонентов в добываемых рудах, качество трудовых ресурсов, инвестиционные лаги, масштабы производства, коэффициенты использования производственных мощностей, наличие и доступность новых технологических решений, качество управления и орга-

низации производственных процессов, рыночная конъюнктура и др. Циклические изменения цен на сырьевые товары и государственное регулирование оказывают дополнительное влияние на производительность горнодобывающих предприятий.

Обычно анализ динамики мультифакторной производительности производят с помощью декомпозиции вклада факторов. Данные также корректируют, чтобы учесть влияние временных лагов между инвестициями и получением обусловленных инвестициями доходов. Но самая сложная задача — это учет качества природного капитала. Наличие этого фактора производства кардинально отличает горнодобывающий сектор (как, впрочем, и сельскохозяйственное производство) от других отраслей экономики.

Учет влияния природного капитала на мультифакторную производительность для условий австралийского горнодобывающего сектора экономики были выполнены в работе [16]. Авторы ввели поправочный коэффициент на качество природного капитала. По их утверждениям, им удалось учесть содержание полезных компонентов в рудах, наличие в них примесей, пластовое давление (для нефти и газа), коэффициенты вскрыши, глубину разработки или добычных скважин, удаленность от поставщиков и потребителей, а также степень сложности условий разработки.

Влияние истощения сырьевой базы на производительность предприятий по добыче металлических полезных ископаемых постоянно меняется в ходе эксплуатации ресурсов, это приводит к периодическим подъемам и спадам в производительности. Было установлено, что до 2006—2007 гг. возросшее использование труда и капитала полностью нивелировали снижение качества природного капитала. Мультифакторная произ-

водительность росла со средним темпом около 2%. Кроме того, рост обеспечивался снижением издержек за счет масштаба производства и внедрения новых технологий добычи и переработки минерального сырья [17].

Но уже с начала 2000-х гг. фиксировался спад мультифакторной производительности (см. рис. 2, а). Это был период сырьевого бума, вызванного спросом на растущих рынках Азии. Увеличение объемов производства при одновременном сокращении высокодоступных запасов полезных ископаемых происходило за счет вовлечения в разработку запасов более низкого качества, требующих большего количества ресурсов. При взрывном росте спроса и цен на минеральную продукцию существенно увеличить объем производства или хотя бы компенсировать снижение качества природного капитала не получилось, несмотря на более чем двукратное увеличение числа занятых в горнодобывающей промышленности и значительный рост производственного капитала. В результате произошел спад как производительности труда, так и многофакторной производительности [22, 23] (рис. 3, а). В России за период 2016—2022 гг. также наблюдалась тенденция к снижению производительности труда (рис. 3, б).

Следующим фактором, помимо природного капитала и трудовых ресурсов, оказывающим влияние на мультифакторную производительность, является производственный капитал. На рис. 4 показана динамика инвестиций в основной капитал и в цифровую инфраструктуру для австралийского горнодобывающего сектора.

В период с начала 2000-х гг. в Австралии также кратно возросли инвестиции в поиск и разведку новых месторождений полезных ископаемых. Однако результативность инвестиций оказалась

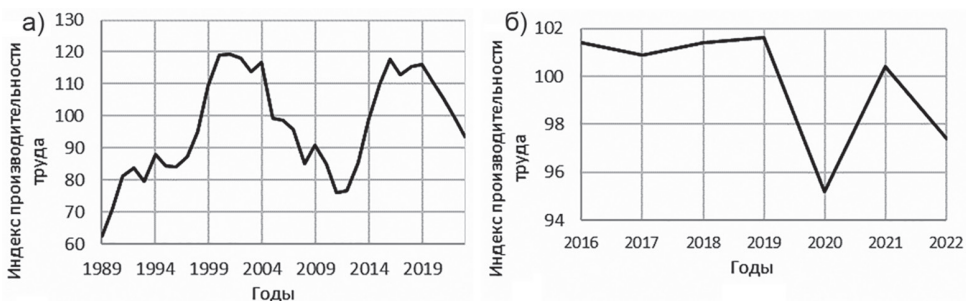


Рис. 3. Индекс изменения производительности труда: Австралия (по данным Australian Bureau of Statistics) (а); Российская Федерация (по данным Росстата) (б)

Fig. 3. Change in labor productivity index: Australia (according to the Australian Bureau of Statistics) (a); the Russian Federation (according to Rosstat) (b)

недостаточной. Улучшения состояния сырьевой базы достичь не удалось, долгосрочный тренд снижения мультифакторной производительности сохранился. Это же можно утверждать и в отношении производительности капитала (рис. 5, а), несмотря на отдельные периоды роста. Слишком короткий интервал наблюдений для российской горнодобывающей отрасли не позволяет сделать такой же вывод (рис. 5, б), но можно заметить, что большую часть рассматриваемого периода индекс производительности был ниже 100%.

Начало процесса цифровизации австралийского добывающего сектора экономики пришлось на 90-е гг. Инвестиции в цифровую трансформацию отрасли рассматривались, в том числе, как способ повышения мультифакторной производительности. 2000-е гг. становятся отправной точкой масштабной цифровизации и внедрения информационных технологий в горное производство.

График на рис. 4 отражает динамику инвестиций в ИТ-технологии. Эти инвестиции включают затраты на компьютерное оборудование и периферию,

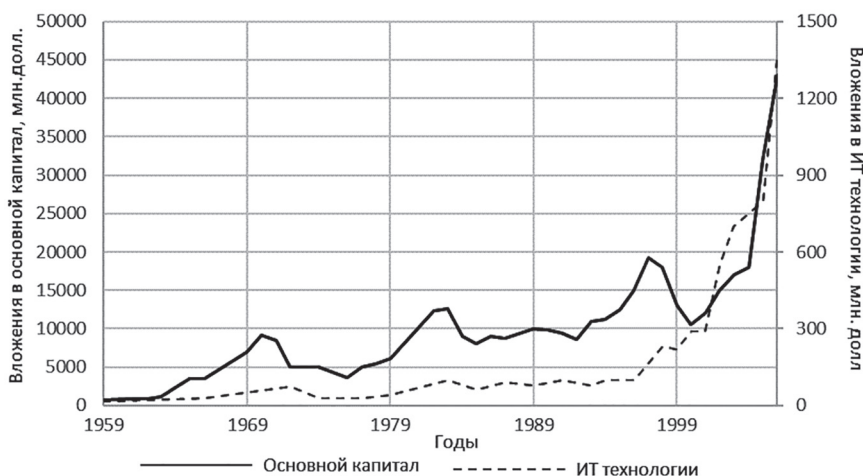


Рис. 4. Динамика вложений в основной капитал и в ИТ-технологии горнодобывающей промышленности Австралии [16]

Fig. 4. Dynamics of investments in fixed assets and IT-technologies in mining in Australia [16]

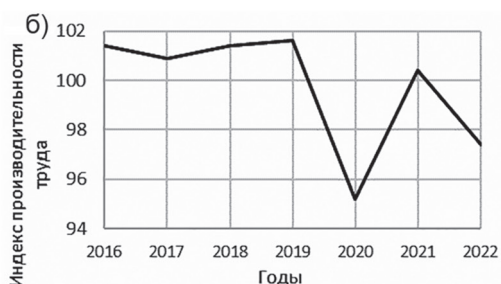
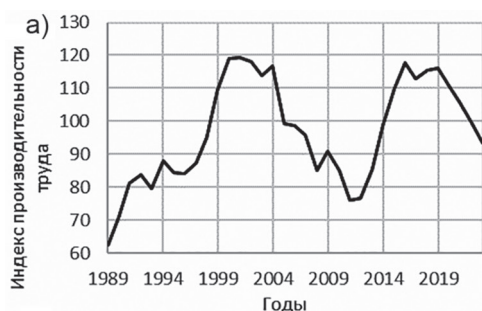


Рис. 5. Динамика производительности производственного капитала: Австралия (а); Российская Федерация (б)

Fig. 5. Dynamics of production capital productivity: Australia (a); Russian Federation (b)

программное обеспечение, электронику, электрооборудование и составляют лишь небольшую долю общих капиталовложений (0,5%). Очевидно, однако, что общие затраты на внедрение и интеграцию информационных технологий были существенно выше.

Статистика по инвестициям в цифровые технологии отечественных горнодобывающих предприятий весьма ограничена. Имеется информация, что эти затраты выросли с 53,3 млрд руб. в 2020 г. до 81,3 млрд руб. в 2022 г. (Российский статистический ежегодник. 2023: Стат. сб. / Росстат. — М., 2023. — 704 с.). Доля затрат на внедрение и использование цифровых технологий в отраслях по добыче полезных ископаемых в настоящее время составляет около 2% от инвестиций в основной капитал.

А в 2022 г. в результате роста себестоимости добычи, логистических проблем, вызванных внешним и внутренним давлением, 50% предприятий горно-металлургического комплекса заявили о снижении объема инвестиций в информационные технологии.

Цифровая трансформация отрасли на данный момент не смогла переломить тенденцию снижения мультифакторной производительности, но позволила частично компенсировать ухудшение качества запасов и горногеологических

условий их разработки, сократить снижение выпуска продукции. Статистические данные по РФ и публикации недропользователей подтверждают, что цифровая трансформация отечественной горнодобывающей отрасли продолжается. Применение указанных выше цифровых технологий позволяет добывающим компаниям улучшать качество планирования своей работы и повышать производительность используемых ресурсов.

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что мультифакторная производительность сырьевых отраслей, как в целом по миру, так и по отдельным ведущим горнодобывающим странам, включая Россию, имеет долгосрочную тенденцию к снижению. Уменьшение эффективности производственного капитала и трудовых ресурсов обусловлено в основном неопределенностью и снижением качества природного капитала во времени, удорожанием геологоразведочных работ и снижением их результативности, ухудшением рыночных условий и циклическим характером изменения цен на минеральное сырье. По вариативности результатов производственной деятельности горнодобывающая отрасль находится на втором месте пос-

ле сельского хозяйства с его сильнейшей зависимостью от природных и климатических условий.

В результате реагирования горнодобывающих предприятий на изменение конъюнктуры сырьевых рынков сложились две типичные стратегии. В моменты сырьевых бумов и увеличения спроса на минеральное сырье растет объем инвестиций в разведку, в увеличение объемов производства на действующих предприятиях, в освоение новых технологий, в том числе в развитие цифровизации и информационных технологий. Эти действия направлены на повышение рентабельности разработки полезных ископаемых и компенсацию негативных последствий ухудшения состояния минерально-сырьевой базы. Такая стратегия была вполне успешной до начала 2000-х годов, после чего тенденция изменилась. Вовлечение в разработку более бедных запасов вызвало снижение производительности труда и более быстрый рост затрат по сравнению с получаемыми доходами. Как показывает выполненный анализ, постоянное снижение качества природного капитала уже не могло быть нивелировано увеличением объемов используемых ресурсов. Тренд на снижение мультифакторной производительности сохраняется.

Вторая распространенная стратегия горнодобывающих компаний заключается в переходе в режим жесткой экономии и сокращения затрат в моменты снижения цен на минеральную продукцию, вплоть до сокращения объемов добычи, временной или постоянной консервации запасов с низкой рентабельностью освоения. Процесс инвестирования в разведку новых месторождений и внедрение передовых технологий прерывается. В условиях оптимизации затрат, в том числе на производственный и управляющий персонал, возрастает роль цифровизации и информационных тех-


нологий. Возможности сокращения затрат по различным переделам горного производства за счет экономии топлива и расходных материалов, автоматизации, цифровизации профилактического обслуживания и ремонтов оборудования, удаленного мониторинга производственных процессов в режиме реального времени и др. становятся конкурентными преимуществами в борьбе за выживание. Как было показано выше, это позволяет повысить производительность труда и, частично, производственного капитала. Использование цифровых технологий как одного из средств компенсации снижения качества природного капитала вполне себя оправдало, хотя и не позволило достичь прежних значений мультифакторной производительности. Но потенциал здесь имеется, и эффекты будут возрастать по мере взросления этих технологий и системности их использования.

Однако наибольший вклад в увеличение эффективности использования ресурсов, на наш взгляд, может быть достигнут при создании единой системы управления производством на базе интеграции математических моделей и методов оптимизации, анализа больших данных, технологий цифровых двойников, коммуникативных технологий, систем мониторинга, функционирующих в режиме реального времени, в едином информационном пространстве.

Прогностический потенциал таких систем открывает совершенно новые пути управления неопределенностью и изменчивостью в горнодобывающей промышленности, обеспечивая возможность целенаправленного повышения производительности производственного и человеческого капитала, планомерного инвестиционного процесса воспроизводства минерально-сырьевой базы и устойчивого развития горнодобывающей отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oh K., Kho H., Choi Y., Lee S. Determinants for successful digital transformation // *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 1215. DOI: 10.3390/su14031215.
2. Цзиньчжань Хуан, Чжицян Ли, Бяо Чэнь, Сен Цуй, Чжаолинь Лу, Вэй Дай, Юэминь Чжао, Чэньлун Дуань, Лян Дон Оперативный контроль элементного состава угольной золы на основе машинного обучения и рентгеновской флуоресценции // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 256. — С. 663–676. DOI: 10.31897/PMI.2022.89.
3. Лукичёв С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // *Горный журнал*. — 2020. — № 9. — С. 12–18. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.01.
4. Soto Setzke D., Riasanow T., Böhm M., Krčmar H. Pathways to digital service innovation: The role of digital transformation strategies in established organizations // *Information Systems Frontiers*. 2023, vol. 25, pp. 1017–1037. DOI: 10.1007/s10796-021-10112-0.
5. Young A., Rogers P. A. Review of digital transformation in mining // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 683–699. DOI: 10.1007/s42461-019-00103-w.
6. Брынь М. Я., Мустафин М. Г., Баширова Д. Р., Васильев Б. Ю. Исследования точности построения цифровых моделей рельефа техногенных массивов по данным спутниковых определений координат // *Записки Горного института*. — 2025. — Т. 271. — С. 95–107.
7. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 257. — С. 822–832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.
8. Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // *Горная промышленность*. — 2020. — № 1. — С. 8–11.
9. Каленов О. Е. Цифровизация горнодобывающей промышленности // *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*. — 2021. — Т. 18. — № 5 (119). — С. 184–192. DOI: 10.21686/2413-2829-2021-5-184-192.
10. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the impact of new technology from a work place perspective // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 701–707.
11. Рыльников А. Г., Пыталев И. А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. — 2020. — № 1. — С. 470–481.
12. Jang H., Topal E. Transformation of the Australian mining industry and future prospects // *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 129, no. 3, pp. 1–15. DOI: 10.1080/25726668.2020.1786298.
13. Балашов А. М. Перспективы использования цифровых решений и возможностей «Индустрии 4.0» в производственных процессах предприятий горной промышленности // *Теоретическая экономика*. — 2024. — № 2. — С. 46–53.
14. Мацко Н. А., Харитонов М. Ю. Цифровизация горной промышленности и состояние минерально-сырьевой базы // *Известия ДВФУ. Экономика и управление*. — 2022. — Т. 103(3). — С. 37–47. DOI: 10.24866/2311-2271/2022-3/37-47.
15. Заболотина Е. С. Современное состояние и развитие технологий на предприятиях горнодобывающей промышленности // *Вестник науки*. — 2024. — № 12(81). — Т. 4. — С. 2187–2193.
16. Topp V., Bloch H., Parha D. Productivity in the mining industry: Measurement and interpretation. Productivity commission staff, Australia, 2008, 150 p.
17. Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution // *Mineral Economics*. 2020, vol. 33, pp. 115–125. DOI: 10.1007/s13563-019-00172-9.
18. Daly A., Humphreys D., Raffo J., Valacchi G. Global challenges for innovation in the mining industries. Cambridge University Press, 2022, pp. 1–24. DOI: 10.1017/9781108904209.
19. De Solminihac H., Gonzales L. E., Cerda R. Copper mining productivity: lessons from Chile // *Journal of Policy Modeling*. 2018, vol. 40, pp. 182–193. DOI: 10.1016/j.jpolmod.2017.09.001.
20. Atakhanova Z., Azhibay S. Assessing economic sustainability of mining in Kazakhstan // *Mineral Economics*. 2023, vol. 36, pp. 719–731. DOI: 10.1007/s13563-023-00387-x.
21. Михненко П. А. Моделирование индексов производительности труда в обрабатывающих производствах и добыче полезных ископаемых // *Вестник УрФУ. Серия Экономика и управление*. — 2019. — Т. 18(4). — С. 505–521. DOI: 10.15826/vestnik.2019.18.4.025.

22. Khanh V. H. Accounting for natural capital in mining MFP: Comparing user costs for non-renewable resources / 35th IARIW General Conference. Copenhagen, Denmark, 2018, 32 p.
23. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 37, pp. 1385 – 1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1. 

REFERENCES

1. Oh K., Kho H., Choi Y., Lee S. Determinants for successful digital transformation. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 1215. DOI: 10.3390/su14031215.
2. Jin Zhang Huang, Zhijiang Li, Biao Chen, Xiang Xu, Zhao Lin Liu, Wei Dai, Min Zhao, Chen Long Duan, Lian Dong. Operational control of the elemental composition of coal ash based on machine learning and X-ray fluorescence. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 663 – 676. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.89.
3. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Digital transformation of the mining industry: past, present, and future. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 12 – 18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.01.
4. Soto Setzke D., Riasanow T., Böhm M., Krcmar H. Pathways to digital service innovation: The role of digital transformation strategies in established organizations. *Information Systems Frontiers*. 2023, vol. 25, pp. 1017 – 1037. DOI: 10.1007/s10796-021-10112-0.
5. Young A., Rogers P. A. Review of digital transformation in mining. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 683 – 699. DOI: 10.1007/s42461-019-00103-w.
6. Bryn M. Ya., Mustafin M. G., Bashirova D. R., Vasiliev B. Y. Studies of the accuracy of constructing digital relief models of man-made massifs based on satellite coordinate definitions. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 271, pp. 95 – 107. [In Russ].
7. Saadoun A., Fredj M., Bukar R., Haji R. Fragmentation analysis using digital image processing and an empirical model (KuzRam): A comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822 – 832. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.
8. Klebanov A. F. Automation and robotization of open-pit mining operations: experience of digital transformation. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 1, pp. 8 – 11. [In Russ].
9. Kalenov O. E. Digitalization of the mining industry. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2021, vol. 18, no. 5 (119), pp. 184 – 192. [In Russ]. DOI: 10.21686/2413-2829-2021-5-184-192.
10. Löw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the impact of new technology from a work place perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 701 – 707.
11. Ryl'nikov A. G., Pytalev I. A. Digital transformation of the mining industry: technical solutions and technological challenges. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 1, pp. 470 – 481. [In Russ].
12. Jang H., Topal E. Transformation of the Australian mining industry and future prospects. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 129, no. 3, pp. 1 – 15. DOI: 10.1080/25726668.2020.1786298.
13. Balashov A. M. Prospects for the use of digital solutions and capabilities of «Industry 4.0» in production processes of mining enterprises. *Theoretical Economics*. 2024, no. 2, pp. 46 – 53. [In Russ].
14. Matsko N. A., Kharitonova M. Yu. Digitalization of the mining industry and the state of the mineral resource base. *Bulletin of the far Eastern federal university. Economics and management*. 2022, vol. 103(3), pp. 37 – 47. [In Russ]. DOI: 10.24866/2311-2271/2022-3/37-47.
15. Zabolotina E. S. The current state and development of technologies in the mining industry. *Vestnik nauki*. 2024, no. 12(81), vol. 4, pp. 2187 – 2193. [In Russ].
16. Topp V., Bloch H., Parha D. *Productivity in the mining industry: Measurement and interpretation*. Productivity commission staff, Australia, 2008, 150 p.
17. Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*. 2020, vol. 33, pp. 115 – 125. DOI: 10.1007/s13563-019-00172-9.
18. Daly A., Humphreys D., Raffo J., Valacchi G. *Global challenges for innovation in the mining industries*. Cambridge University Press, 2022, pp. 1 – 24. DOI: 10.1017/9781108904209.
19. De Solminihac H., Gonzales L. E., Cerda R. Copper mining productivity: lessons from Chile. *Journal of Policy Modeling*. 2018, vol. 40, pp. 182 – 193. DOI: 10.1016/j.jpolmod.2017.09.001.

20. Atakhanova Z., Azhibay S. Assessing economic sustainability of mining in Kazakhstan. *Mineral Economics*. 2023, vol. 36, pp. 719–731. DOI: 10.1007/s13563-023-00387-x.
21. Mikhnenko P. A. Modeling of labor productivity indices in manufacturing industries and mining. *Vestnik Ural'skogo federal'nogo universiteta. Seriya ekonomika i upravlenie*. 2019, vol. 18(4), pp. 505–521. [In Russ]. DOI: 10.15826/vestnik.2019.18.4.025.
22. Khanh V. H. Accounting for natural capital in mining MFP: Comparing user costs for non-renewable resources. *35th IARIW General Conference*. Copenhagen, Denmark, 2018, 32 p.
23. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мацко Наталья Аркадьевна — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (ФИЦ ИУ РАН), e-mail: matsko@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0001-8690-5369,

Харитоновна Маргарита Юрьевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, e-mail: margaret.ok@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-6768-6754.

Для контактов: Мацко Н.А., e-mail: matsko@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Matsko, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS), 119333, Moscow, Russia, e-mail: matsko@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0001-8690-5369,

M.Yu. Kharitonova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences — a Separate Unit of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», 660036, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: margaret.ok@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-6768-6754.

Corresponding author: N.A. Matsko, e-mail: matsko@inbox.ru.

Получена редакцией 24.03.2025; получена после рецензии 30.04.2025; принята к печати 10.09.2025.
Received by the editors 24.03.2025; received after the review 30.04.2025; accepted for printing 10.09.2025.

