

УДК 622:004.9:519.866

<http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-4-486-495>

Моделирование динамики распространения цифровых технологий в горнодобывающей отрасли с использованием логистической кривой

Маргарита Юрьевна Харитонова^{1, 2}

¹ Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия, margaret.ok@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6768-6754>

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация

Цель. Оценить масштабы внедрения цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях России и сроки достижения максимального влияния таких технологий на снижение текущих затрат в отрасли.

Задачи. Выполнить анализ эффективности применения цифровых технологий на отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятиях; выбрать целевой показатель ожидаемого эффекта от использования таких технологий; выявить и адаптировать под решаемые задачи модель для прогнозирования распространения цифровых технологий; подготовить исходные данные для моделирования; провести прогноз с использованием модели.

Методология. Автором применен метод экономико-математического моделирования. Моделирование осуществлено с использованием логистической функции. Исходные данные для моделирования — это статистическая информация, существующая на момент расчета, опросы специалистов горных компаний и участников рынка.

Результаты. В настоящее время прослеживается долгосрочная тенденция к снижению производительности факторов производства в горнодобывающей отрасли вследствие ухудшения качества используемых ресурсов. Применяя цифровые технологии, предприятия снизят эксплуатационные издержки и смогут замедлить снижение производительности факторов производства. В статье представлен прогноз количества предприятий по добыче полезных ископаемых, принявших решение об использовании цифровых технологий: облачные сервисы, технологии сбора, обработки и анализа больших данных, геоинформационные системы, интернет вещей, промышленные роботы и автоматизированные линии. Прогнозные кривые количества предприятий, принявших решение о применении таких технологий, представлены как функции от времени. Определены точки перегиба, разделяющие кривые на участки с различной скоростью роста. Установлено, что все рассматриваемые технологии, кроме технологий больших данных, находятся на этапе медленного увеличения кумулятивного количества предприятий, принявших решение об использовании цифровых технологий. Максимум количества предприятий, использующих такие технологии, будет достигнут через 6–13 лет. До момента, когда их применение достигнет этапа замедляющегося роста, пройдет около 10–17 лет, до приближения к пределу насыщения — более 20 лет.

Выводы. Выполнен прогноз срока, в течение которого цифровые нововведения смогут частично нивелировать рост затрат в результате ухудшения качества разрабатываемых запасов. Такой период составляет 6–13 лет. За это время при внедрении цифровых технологий будет достигнуто прогнозируемое снижение эксплуатационных затрат. Оно поможет частично компенсировать рост эксплуатационных затрат в связи с ухудшением качества запасов и замедлить снижение производительности. Если к этому времени не появятся технологии, позволяющие снизить текущие эксплуатационные затраты на добычу и переработку минерального сырья, спад эффективности использования производственных ресурсов продолжится.

© Харитонова М. Ю., 2026

Данная статья является статьей открытого доступа, распространяемой в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Ключевые слова: горнодобывающая отрасль, производительность факторов производства, цифровые технологии, эксплуатационные затраты, логистическая модель

Для цитирования: Харитонов М. Ю. Моделирование динамики распространения цифровых технологий в горнодобывающей отрасли с использованием логистической кривой // *Экономика и управление*. 2026. Т. 32. № 4. С. 486–495. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-4-486-495>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН (проект FWES-2026-0004).

The digital technology diffusion dynamics simulation in the mining industry using a logistic curve

Margarita Yu. Kharitonova^{1, 2}

¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, margaret.ok@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6768-6754>

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

Aim. This work aimed to assess the scale of digital technology adoption at Russian mining companies and the timeframe for achieving the maximum impact of such technologies on reducing current expenditures in the industry.

Objectives. The work seeks to analyze the effectiveness of digital technology adoption at mining companies in Russia and other countries; select a target indicator for the expected impact of such technologies; identify and adapt a model for forecasting the diffusion of digital technologies to the tasks being solved; prepare initial data for simulation; and conduct a forecast using the model.

Methods. We applied economic and mathematical simulation. The simulation was conducted using a logistic function. The initial data for the simulation included statistical information available at the time of calculation, surveys of mining company specialists, and market participants.

Results. There is currently a long-term trend toward declining productivity of production factors in the mining industry due to the deteriorating quality of the resources used. Companies will reduce operating costs and slow the decline in productivity by adopting digital technologies. This article presents a forecast for the number of mining companies that have decided to use digital technologies, namely cloud services, big data collection, processing, and analysis, geographic information systems, the Internet of Things, industrial robots, and automated production lines. The forecast curves for the number of companies adopting these technologies are presented as functions of time. Inflection points are identified, dividing the curves into sections with different growth rates. It is established that all the technologies under consideration, with the exception of big data, are in a phase of slow growth in the cumulative number of companies adopting digital technologies. The peak number of companies using these technologies will be reached in 6–13 years. It will take approximately 10–17 years for their adoption to reach a stage of decelerating growth, and more than 20 years before they reach the saturation limit.

Conclusions. A forecast has been made for the period (6–13 years) during which digital innovations will be able to offset partially the increase in costs resulting from the deterioration of the quality of developed reserves. During this time, the implementation of digital technologies will achieve the predictable reduction in operating costs. This reduction will help partially offset the increase in operating costs due to the deterioration of reserve quality and slow the decline in productivity. If technologies that reduce current operating costs for mineral extraction and processing do not emerge by this time, the decline in the efficiency of production resources will continue.

Keywords: mining industry, factor productivity, digital technologies, operating costs, logistics model

For citation: Kharitonova M. Yu. The digital technology diffusion dynamics simulation in the mining industry using a logistic curve. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2026;32(4):486–495. (In Russ.). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-4-486-495>

Acknowledgments: This work was conducted as part of a state assignment for the Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project FWES-2026-0004).

Введение

Приблизительно с 2000 г. производительность факторов производства в горнодобывающей промышленности в мире значительно снизилась [1]. В настоящее время перед отраслью стоит задача преодолеть или хотя бы замедлить это снижение. Одним из факторов роста производительности могут стать инновации и технологические изменения, происходящие в отрасли [2]. Особая роль сегодня отведена инновациям в сфере цифровых технологий [3]. Преимущества, которые открывает цифровая трансформация для повышения производительности в горнодобывающей отрасли, очевидны и широко представлены в отечественной и зарубежной научной литературе. Известны данные о том, что цифровые инновации в горнодобывающей отрасли помогут увеличить рентабельность разработки запасов¹, сократить вредное воздействие добычи полезных ископаемых на окружающую среду [4], повысить точность интерпретации геологических данных [5; 6; 7] и оперативность принятия решений [8; 9; 10].

Горнодобывающее производство является консервативным. Принципиально новые технологические решения появляются редко, а после внедрения в практику недропользования — в течение длительного периода остаются неизменными. Медленно происходит внедрение цифровых решений. По данным исследования², большинство горнодобывающих компаний в мире находится на стадии подготовки к внедрению цифровых технологий. В России в 2023 г. среди предприятий по добыче полезных ископаемых использовали технологии анализа больших данных 12,8 %, облачные серверы — 18,5 %, геоинформационные системы — 18 %, цифровые платформы — 11,6 %, интернет вещей — 13,2 %,

RFID-технологии — 15,5 %, технологии искусственного интеллекта — 2,1 %, промышленные роботы / автоматизированные линии — 3,8 %³. Остальные горнодобывающие предприятия применяли цифровые технологии на уровне отдельных процессов.

Проблема снижения производительности в горнодобывающей отрасли осложнена тем, что необходимо компенсировать истощение запасов полезных ископаемых. До настоящего времени современные технологические решения и инновации, включая цифровые, позволяли сдерживать снижение эффективности разработки в результате ухудшения состояния минерально-сырьевой базы [2]. Сохранится ли такая тенденция в будущем с учетом того, что лишь немногие среди предприятий горнодобывающего комплекса, как показано выше, внедряют отдельные цифровые решения? Если за целевое значение ожидаемого эффекта от внедрения цифровых технологий принять снижение эксплуатационных затрат по всей производственной цепочке на 3–7 %⁴, то за какой период оно будет достигнуто? Для ответа на эти вопросы необходимо прогнозировать динамику распространения цифровых технологий на предприятиях по добыче полезных ископаемых в Российской Федерации (РФ). Очевидно, что точный прогноз вряд ли возможен, но важно хотя бы представлять масштабы внедрения цифровых технологий и связанные с этим возможности влияния на затраты горнодобывающих предприятий.

В экономической литературе для описания процесса распространения инновационных процессов используют логистическую (S-образную) кривую [11; 12; 13]. Логистическая зависимость предполагает, что система в своем развитии во времени проходит несколько стадий. Сначала идет экспоненциальный рост, затем — почти линейная фаза, далее — замедляющийся рост и, наконец,

¹ Durrant-Whyte H., Geraghty R., Pujol F., Sellschop R. How digital innovation can improve mining productivity // McKinsey & Company. November. 2015. URL: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Chemicals/Our%20Insights/How%20digital%20innovation%20can%20improve%20mining%20productivity/How_digital_innovation_can_improve_mining_productivity.pdf (дата обращения: 03.02.2026).

² At a crossroads: The connected mine evolution // Rockwell Automation. March. 2019. URL: www.literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/min-wp003_-en-p.pdf (дата обращения: 03.02.2026).

³ Абашкин В. Л., Абдрахманова Г. И., Вишневский К. О. и др. Цифровая экономика: 2025: краткий стат. сб. // Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ «Высшая школа экономики». 2025. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/995751983.pdf?ysclid=mn2w203piu389925272> (дата обращения: 15.01.2026).

⁴ Натрусов Н., Садардинов И., Емельченков С. Цифровизация горно-металлургической отрасли России в 2024 году // Яков и Партнеры. 2024. Апрель. URL: https://yakov.partners/upload/iblock/67c/cjwhz656wjsfn0up1ze8ka8qg7uxppm8/20240423_Digital_mining.pdf (дата обращения: 03.02.2026).

приближение к постоянному уровню или насыщению. Данная зависимость непротиворечиво описывает динамику распространения инновационных технологий в отрасли. Сначала происходит медленное внедрение новой технологии (ресурса), выраженное в постепенном кумулятивном накоплении количества компаний, принимающих решение об использовании. Затем, по мере распространения информации о превосходстве данной технологии над существующими, ее эффективности, количество предприятий, внедряющих ее в свою практику, резко возрастает и достигает пика. Происходит быстрое кумулятивное накопление ресурса. Оно замедляется по мере увеличения количества предприятий, использующих данную технологию.

В рамках минерально-сырьевого комплекса страны или региона такая тенденция распространения инноваций в долгосрочном периоде также должна быть сохранена. Поэтому для прогнозирования динамики во времени количества предприятий, использующих цифровую технологию, в настоящем исследовании применена адаптированная нами логистическая модель.

Теоретическая модель

Общее (кумулятивное) количество предприятий, применяющих технологию (% от общего количества предприятий), как функция времени ($P(t)$) представлено уравнением:

$$P(t) = \frac{SP_0 e^{rt}}{S + P_0(e^{rt} - 1)}, \quad (1)$$

где S — максимальное количество предприятий, использующих технологию (предел насыщения), % от общего количества предприятий;

P_0 — начальное значение параметра — количество предприятий, использующих технологию на момент времени t_0 , % от общего количества предприятий;

r — параметр, характеризующий скорость внедрения технологии.

Количество предприятий, использующих технологию впервые (количество в год) — это скорость изменения общего количества предприятий, производная $P'(t)$ по t :

$$\begin{aligned} P'(t) &= \frac{dP(t)}{dt} = \frac{SP_0 r e^{rt} (S - P_0)}{(S + P_0(e^{rt} - 1))^2} = \\ &= P(t) \frac{r(S - P_0)}{S + P_0(e^{rt} - 1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Функция (1) показывает изменение суммарного количества предприятий, использующих технологию, сопровождающееся изменением скорости роста, в виде S-образной кривой. Логистическая кривая (1) отражает кумулятивное (накопленное) количество предприятий, использующих технологию к моменту времени t . С течением времени логистическая кривая приближается к уровню насыщения, соответствующему максимально возможному количеству предприятий, использующих инновационную технологию. График годового количества предприятий, принимающих решение об использовании цифровой технологии (2), имеет колоколообразную форму. Особенностью логистической кривой является существование на ней точек перегиба ($t_{\max}$, t_1 , t_2 и T), разделяющих кривую на участки с различной скоростью роста: медленный, быстрый, замедляющийся, приближение к пределу насыщения.

Момент времени, в который количество предприятий, принявших решение об использовании технологии, достигнет максимума, можно определить, приравняв к нулю вторую производную рассматриваемой функции. Пиковое значение количества предприятий (в год) достигается в год $t_{\max}$:

$$t_{\max} = \frac{1}{r} \ln \frac{S - P_0}{P_0}.$$

Стадия медленного роста количества предприятий, использующих технологию впервые, продолжается от момента времени t_0 до t_1 :

$$t_1 = \frac{1}{r} \ln \frac{P_0 - S}{-2P_0}.$$

Стадия быстрого роста количества предприятий, использующих технологию впервые, продолжается от момента времени t_1 до t_2 :

$$t_2 = \frac{1}{r} \ln \frac{2(S - P_0)}{P_0}.$$

Стадия затухающего роста прослеживается от момента времени t_2 до T .

Период, в течение которого новая технология будет применена на свыше 95 % предприятий от максимального значения (предела насыщения) (T), может быть определен следующим образом:

$$T = \frac{1}{r} \ln \left[\frac{1}{P_0} \left(\frac{S^2 + SP_0}{\Delta} - S + P_0 \right) \right],$$

где $\Delta = 0,05S$.

Исходные данные для моделирования

В статье представлен прогноз количества предприятий по добыче полезных ископаемых, принявших решение об использовании цифровых технологий, статистическая информация о которых размещена в открытом доступе¹: облачные сервисы, технологии сбора, обработки и анализа больших данных, геоинформационные системы, интернет вещей, промышленные роботы и автоматизированные линии.

Значения S (предел насыщения) заданы исходя из результатов опроса специалистов более чем 120 горнодобывающих компаний. Эти специалисты выделили технологии, которые окажут наибольшее влияние на рентабельность, производительность и безопасность в отрасли в перспективе 5–10 лет [1]. Так, если 92,2 % опрошенных признали эффективность технологии облачных сервисов для деятельности компании, считаем, что 92,2 % предприятий — это максимальное количество предприятий, на которых будет принято решение о внедрении такой технологии.

Начальные значения параметра P_0 на момент расчета приняты из официальной статистики². Значение параметра r (скорость внедрения) получено расчетным путем из фактических данных о распространении персональных компьютеров, статистические данные о которых известны за 20 предшествующих расчетам лет.

Результаты и обсуждение

Цифровизация горнодобывающей отрасли — непрерывный длительный процесс, который представляет собой распространение (диффузию) новых цифровых технологий на предприятия отрасли. Эффект от их использования проявляется не одномоментно и может осуществляться в течение продолжительного периода. Однако в любом случае влияние цифровых технологий на производительность отрасли зависит от количества фирм, уже использующих ее. Моделирование позволило выделить главные этапы этого процесса и определить время, в течение которого количество предприятий, принявших решение о применении технологий, достигнет максимума и окажет максимальное положительное влияние на производительность отрасли.

Построены S -образные зависимости от времени количества предприятий, принявших решение о внедрении новых технологий, как видно на рисунке 1. Начало прогноза — 2023 г. Исходные данные для расчета и прогноз точек перегиба приведены в таблице 1.

Моделирование показало, что все рассматриваемые технологии, кроме больших данных, находятся на этапе медленного увеличения кумулятивного количества предприятий, использующих их. Количество предприятий, применяющих рассматриваемые цифровые технологии, достигнет максимума через 6–13 лет (точка перегиба $t_{\max}$). За этот период будут получены основные эффекты и выгоды от внедрения цифровых технологий на уровне отрасли. Максимальное снижение издержек и влияние на производительность факторов производства также приходится на этот период.

До момента, когда использование технологий достигнет этапа замедляющегося роста, пройдет около 10–17 лет. Это время дальнейшего развития процесса цифровизации отрасли. До приближения к пределу насыщения пройдет более 20 лет. К указанному периоду 95 % предприятий из таких, которые рассматривали возможность внедрения в свои процессы цифровых технологий, уже сделают это. Проявление основных эффектов и преимуществ к этому времени будет завершено. Действие дополнительных эффектов, которые вызывает использование цифровых технологий, может продолжаться еще долго. В течение продолжительного периода будут проявляться социальные эффекты: улучшение условий труда, безопасности работ и экологические эффекты [14; 15], эффекты от сокращения аварийных простоев [16] и др.

Из рассмотренных можно выделить технологию промышленных роботов. Ей необходимо больше времени для внедрения в практику недропользования даже при существенно меньшем уровне насыщения. Прогнозируемый уровень насыщения для роботизированной горной техники составляет в целом 35,3 %. Это связано со спецификой и сложностями применения данной технологии. Так, применение автономных самосвалов в открытых горных работах требует дополнительного обучения персонала, повышенного качества дорог, соблюдения

¹ Абашкин В. Л., Абдрахманова Г. И., Вишневский К. О. и др. Указ. соч.

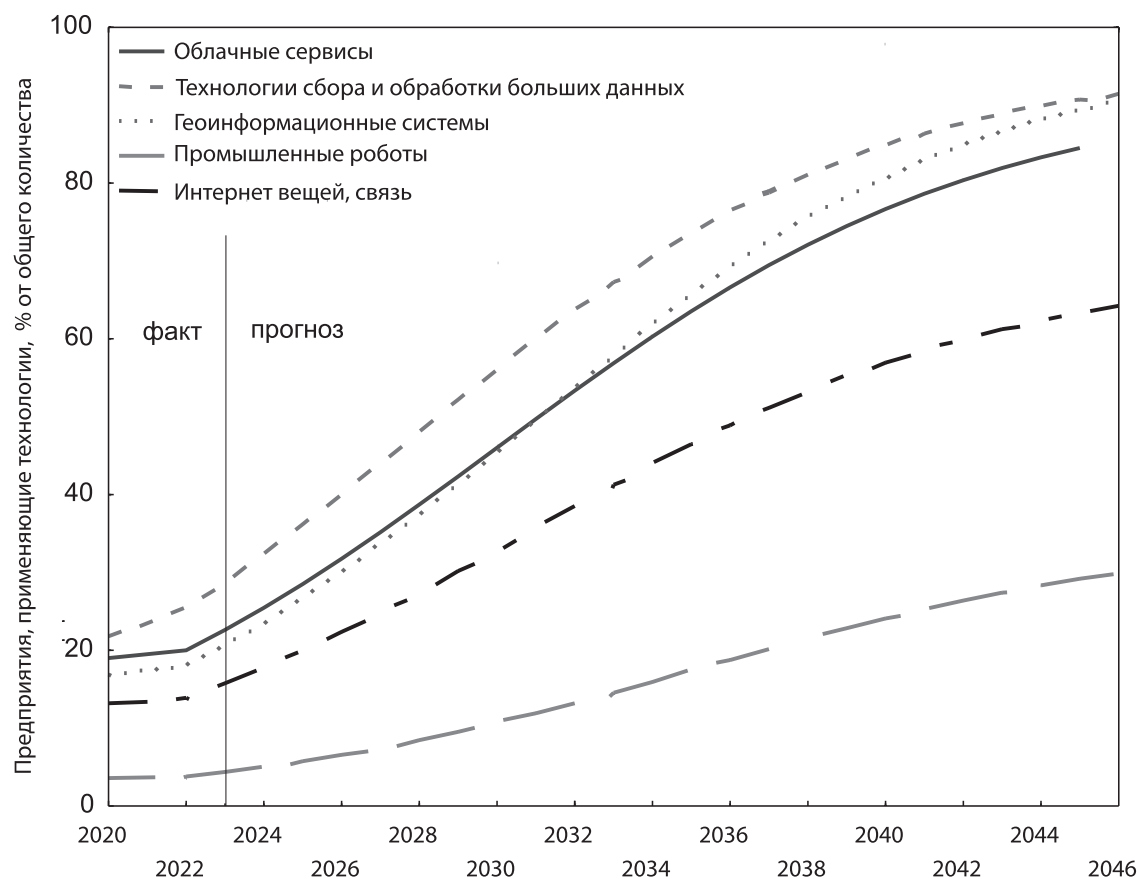


Рис. 1. Прогноз общего количества предприятий, применяющих цифровые технологии, 2023–2046 гг.

Fig. 1. Forecast of the total number of enterprises using digital technologies, 2023–2046

Источник: составлено автором.

Таблица 1

Исходные данные и результат расчета

Table 1. Initial data and calculation results

Показатели	Использование технологий, % от общего количества предприятий				
	Облачные сервисы	Технологии сбора, обработки и анализа больших данных	Геоинформационные системы	Интернет вещей	Промышленные роботы и автоматизированные линии
Факт					
2020	19	21,8	16,9	13,9	3,6
2022	20	25,6	18	13,2	3,8
Предел насыщения	92,2	95,7	97,4	69,8	35,3
Прогноз точек перегиба, лет					
$t_{\max}$	8	6	9	8	13
t_1	4	2	5	4	8
t_2	12	10	13	12	17
T	25	24	27	26	30

Источник: составлено автором.

юридических требований и норм, которые не позволяют эксплуатировать беспилотную технику в определенных условиях [17]. Внедрение промышленных роботов представляет собой технологически сложную задачу, требующую значительных инвестиций, вычислительных мощностей и специализированного программного обеспечения. Этим можно объяснить относительно медленные темпы распространения технологии в РФ, в отличие от мировой практики недропользования, в которой количество применений автономных самосвалов вышло на экспоненциальный рост¹.

Как показали расчеты, максимальный эффект в горнодобывающей отрасли от снижения затрат в результате внедрения цифровых технологий будет достигнут в течение 6–13 лет, в период быстрого роста количества предприятий, применяющих в деятельности технологии облачных сервисов, больших данных, геоинформационные технологии. Технологии промышленных роботов и автоматизированных линий будут распространяться более медленными темпами и достигнут предела насыщения значительно позднее. Полученный прогноз можно считать оптимистичным. Ввиду проблем, с которыми сталкиваются большая часть недропользователей при освоении цифровых технологий (рост сложности решений, дефицит компетенций, бюрократизация процессов, нехватка инвестиций²), фактическое количество предприятий, использующих цифровые технологии, скорее всего, будет меньше, а значит, слабее влияние на сокращение текущих затрат.

Выводы

Долгосрочная тенденция к снижению производительности капитала и трудовых ресурсов, наблюдаемая на современном этапе, вынуждает компании искать пути сокращения затрат на добычу и переработку минерального сырья. Проблема осложнена тем, что при решении этой задачи необходимо преодолеть истощение запасов полезных ископаемых, которое заключается в снижении содержания полезного компонента, увеличении коэффициентов вскрыши, твердости породы, более сложной минералогии, росте затрат на компенсацию вред-

ного воздействия на окружающую среду и др. Существует мнение, согласно которому инновации в сфере цифровых технологий смогут предотвратить снижение производительности горнодобывающей отрасли или хотя бы замедлить его. Однако уровень цифровизации российских горнодобывающих предприятий невысок.

В большинстве компаний цифровые технологии находятся на начальной стадии внедрения или применяются на отдельных процессах. Это связано со сложностью процесса горнодобывающего производства, а также со спецификой отрасли: каждое новое применение цифровой технологии требует существенных затрат на адаптацию под конкретные горно-геологические условия. Чтобы оценить влияние цифровых технологий на производительность отрасли, нужно хотя бы представлять масштаб их применения в долгосрочной перспективе.

Для этого построены прогнозные кривые масштабов применения цифровых технологий, как функции от времени. Кривые построены в соответствии с логистической зависимостью, которая имеет следующую интерпретацию. На начальном этапе внедрение инновации происходит медленно. Далее инновация доказывает преимущества перед существующими технологиями, и скорость ее распространения возрастает, достигает пика, а затем замедляется вследствие того, что возможности новой технологии ограничены.

Установлено, что почти трехкратное повышение использования технологий анализа больших данных, геоинформационных систем, облачных сервисов в течение 6–13 лет приведет к снижению эксплуатационных затрат на добычу и переработку минерального сырья, тем самым поможет частично компенсировать рост эксплуатационных издержек в связи с ухудшением качества запасов и замедлить снижение производительности. Количество предприятий, принявших решение использовать цифровые технологии в этот период, достигнет максимума. Через 10–17 лет прирост общего (кумулятивного) количества предприятий, применяющих цифровые технологии, начнет замедляться, как и эффект от их использования. Через 20 лет общее количество предприятий, использующих такие технологии,

¹ Натрусов Н., Садардинов И., Емельченков С. Указ. соч.

² Там же.

приблизится к пределу насыщения. В итоге возможности цифровых технологий влиять на издержки предприятий будут исчерпаны. К этому времени должны быть созданы предпосылки, позволяющие снизить текущие эксплуатационные затраты на добычу и переработку минерального сырья. В противном случае снижение эффективности использования производственных ресурсов продолжится.

Угруппированные оценки, представленные в настоящей статье, могут быть полезны для

управления развитием минерально-сырьевых ресурсов и принятия стратегических решений. Для точного ответа на вопрос о возможности цифровых технологий влиять на производительность отрасли необходимо видится сопоставление темпов роста затрат в результате ухудшения условий разработки и темпов снижения затрат с учетом применения цифровых технологий, что станет предметом дальнейших исследований.

Список источников

1. *Humphreys D.* Mining productivity and the Fourth Industrial Revolution // *Mineral Economics*. 2020. Vol. 33. No. 1–2. P. 115–125. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00172-9>
2. *Tilton J. E.* Cyclical and secular determinants of productivity in the copper, aluminum, iron ore, and coal industries // *Mineral Economics*. 2014. Vol. 27. No. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s13563-014-0045-9>
3. *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. No. 1. P. 1017–1037. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10112-0>
4. *Hilario da Silva T. H., Sehnem S.* The circular economy and Industry 4.0: Synergies and challenges // *Revista de Gestão*. 2022. Vol. 29. No. 3. P. 300–313. <https://doi.org/10.1108/REG-07-2021-0121>
5. *Карнаухов А. М.* Направления развития «цифрового рывка» в геологоразведке // *Нефтегазовая геология. Теория и практика: сетевое издание*. 2019. Т. 14. № 4. С. 5. https://doi.org/10.17353/2070-5379/46_2019
6. *Баранников А. Г.* О цифровизации параметров частиц самородного золота при изучении россыпей и шлихо-минералогических исследованиях // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2021. № 2. С. 60–72. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-60-72>
7. *Liu C., Chen J., Li S., Qin T.* Construction of conceptual prospecting model based on geological Big Data: A case study in Songtao-Huayuan Area, Hunan Province // *Minerals*. 2022. Vol. 12. No. 6. Article 669. <https://doi.org/10.3390/min12060669>
8. *Cadavid J. P. U., Lamouri S., Grabot B., Fortin A.* Machine learning in production planning and control: A review of empirical literature // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. No. 13. P. 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.155>
9. *Vidosav M., Simeunović V., Mitrović R. et al.* How to apply the ERP model for smart mining? // *MATEC Web of Conferences*. 2022. Vol. 368. Article 01015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236801015>
10. *Каленов О. Е.* Цифровизация горнодобывающей промышленности // *Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова*. 2021. Т. 18. № 5. С. 184–192. <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2021-5-184-192>
11. *Рогачев А. Ф., Симонов А. Б.* Моделирование диффузии инноваций на региональных рынках с учетом информационных аспектов // *Дружковский вестник*. 2023. № 2. С. 270–283. <https://doi.org/10.17213/2312-6469-2023-2-270-283>
12. *Нижегородцев Р. М.* Модели логистической динамики как инструмент экономического анализа и прогнозирования // *Моделирование экономической динамики: риск, оптимизация, прогнозирование: сб. ст. / под ред. Р. М. Нижегородцева. М.: Диалог-МГУ, 1997. С. 34–51.*
13. *Чаруйская М. А.* Исследование моделей жизненного цикла технологий // *Экономические науки*. 2024. № 230. С. 38–45. <https://doi.org/10.14451/1.230.38>
14. *Mielli F., Bulanda N.* Digital transformation: Why projects fail, potential best practices and successful initiatives // *IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*. (St. Louis, MO, April 28-May 02, 2019). New York, NY: IEEE, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CITCON.2019.872910515>
15. *Ma L.* Study on intelligent mine based on the application of 5G wireless communication system // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 558. Article 032050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/3/032050>

16. Кучковская Н. В. Экономическая эффективность цифровой трансформации горнодобывающих предприятий в условиях технологической модернизации и решений Индустрии 4.0 // Горная промышленность. 2025. № 6. С. 88–96. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96>
17. Хазин М. Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. 2020. Т. 18. № 1. С. 4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>

References

1. Humphreys D. Mining productivity and the Fourth Industrial Revolution. *Mineral Economics*. 2020;33(1-2):115-125. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00172-9>
2. Tilton J.E. Cyclical and secular determinants of productivity in the copper, aluminum, iron ore, and coal industries. *Mineral Economics*. 2014;27(1):1-19. <https://doi.org/10.1007/s13563-014-0045-9>
3. 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;25(1):1017-1037. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10112-0>
4. Hilario da Silva T.H., Sehnem S. The circular economy and Industry 4.0: Synergies and challenges. *Revista de Gestão*. 2022;29(3):300-313. <https://doi.org/10.1108/REGE-07-2021-0121>
5. Karnaukhov A.M. Directions of “digital wrench” development in geological petroleum exploration. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology — Theoretical and Applied Studies*. 2019;14(4):5. (In Russ.). https://doi.org/10.17353/2070-5379/46_2019
6. Barannikov A.G. On the digitalization of the parameters of native gold particles in the study of placers and concentrate and mineralogical studies. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2021;(2):60-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-60-72>
7. Liu C., Chen J., Li S., Qin T. Construction of conceptual prospecting model based on geological Big Data: A case study in Songtao-Huayuan Area, Hunan Province. *Minerals*. 2022;12(6):669. <https://doi.org/10.3390/min12060669>
8. Cadavid J.P.U., Lamouri S., Grabot B., Fortin A. Machine learning in production planning and control: A review of empirical literature. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(13):385-390. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.155>
9. Vidosav M., Simeunović V., Mitrovic R., et al. How to apply the ERP model for smart mining? *MATEC Web of Conferences*. 2022;368:01015. <https://doi.org/10.1051/matecco-nf/202236801015>
10. Kalenov O.E. Digitalization in the mining industry. *Vestnik Rossiiskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova = Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2021;18(5):184-192. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2021-5-184-192>
11. Rogachev A.F., Simonov A.B. Modeling the diffusion of innovations in regional markets considering information aspects. *Drukerovskii vestnik*. 2023;(2):270-283. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/2312-6469-2023-2-270-283>
12. Nizhegorodtsev R.M. Models of logistic dynamics as a tool for economic analysis and forecasting. In: Modeling of economic dynamics: Risk, optimization, forecasting: Coll. pap. Moscow: Dialog-MGU; 1997:34-51. (In Russ.).
13. Charuyskaya M.A. Research on technology life cycle models. *Ekonomicheskie nauki = Economic Sciences*. 2024;(230):38-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.14451/1.230.38>
14. Mielli F., Bulanda N. Digital transformation: Why projects fail, potential best practices and successful initiatives. In: IEEE-IAS/PCA cement industry conf. (IAS/PCA). (St. Louis, MO, April 28-May 02, 2019). New York, NY: IEEE; 2019:1-6. <https://doi.org/10.1109/CITCON.2019.8729105>
15. Ma L. Study on intelligent mine based on the application of 5G wireless communication system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;558:032050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/3/032050>
16. Kuchkovskaya N.V. Economic efficiency of digital transformation of mining companies in conditions of technological modernization and Industry 4.0 solutions. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*. 2025;(6):88-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96>
17. Khazin M.L. Robotic equipment for mining operations. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020;18(1):4-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>

Информация об авторе

Маргарита Юрьевна Харитоновна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник¹, доцент кафедры экспериментальной физики и инновационных технологий²

¹ Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 24

² Сибирский федеральный университет

660041, Красноярск, Свободный пр., д. 79

Поступила в редакцию 17.02.2026
Прошла рецензирование 13.03.2026
Подписана в печать 27.04.2026

Information about the author

Margarita Yu. Kharitonova

PhD in Technical Sciences, senior researcher¹, Associate Professor at the Department of Experimental Physics and Innovative Technologies²

¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, FRC KSC SB RAS

50 Akademgorodok, bldg. 24, Krasnoyarsk 660036, Russia

² Siberian Federal University

79 Svobodnyy Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

Received 17.02.2026
Revised 13.03.2026
Accepted 27.04.2026

Конфликт интересов: автор декларирует отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest related to the publication of this article.