

# Цифровизация горной промышленности и состояние минерально-сырьевой базы

Наталья Мацко<sup>1</sup>, Маргарита Харитоновна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФИЦ «Информатика и управление» РАН,

г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт химии и химической технологии СО РАН,

г. Красноярск, Россия

## Информация о статье

Поступила в редакцию:

13.10.2022

Принята

к опубликованию:

28.12.2022

УДК 330.34

JEL O13, L71, L72, Q32

## Ключевые слова:

информационные технологии, минерально-сырьевая база, структура себестоимости, рентабельность добычи полезных ископаемых.

## Keywords:

information technologies, mineral resource base, cost structure, profitability of mineral extraction.

## Аннотация

*Рассмотрены основные подходы к оценке темпов истощения сырьевых ресурсов, особенности горных и геологоразведочных работ, результаты влияния научно-технического прогресса на состояние минерально-сырьевой базы. Обобщён опыт и перспективы цифровизации в минерально-сырьевом секторе. Приведены прогнозные и фактические данные эффективности цифровизации в отдельных процессах горного производства. Выполнена укрупнённая оценка сокращения производственных затрат. Сделан вывод о невозможности компенсации ухудшающихся во времени условий при локальном характере использования информационных технологий.*

## Digitalization of the Mining Industry and the State of the Mineral Resource Base

Natalia A. Matsko, Margarita Yu. Kharitonova

## Abstract

*The use of digital technologies in mining industry is an extremely urgent task as the mineral resource base is depleted, mining costs increase, and the effectiveness of geological exploration decreases. The opportunities to increase the profitability of mineral deposit development through the use of information technologies are promising. The article presents main approaches to assessing the rate of mineral resources depletion, reflects the specific features of*

*mining and geological exploration, analyzes the impact of the results of scientific and technological progress in the field of mining and processing of minerals on the state of mineral resource base. It is noted that the possibilities of reducing production costs and improving the efficiency of mineral development through the use of new technical and technological solutions have already been exhausted by now. The use of information technologies is an actual and promising direction. The experience of using digital technologies in mineral resource sector is considered. The immediate and long-term prospects for the introduction of information technologies are outlined. Some forecast and actual data on the effectiveness of digitalization in individual mining processes are presented. Using information on the structure of the cost of mineral extraction and processing, an enlarged assessment of the possibility of reducing production costs was carried out for local nature of the use of information technologies. It is concluded that only the integration of digital technologies into one integrated production management system can reduce mining and processing costs on a scale that makes it possible to compensate for the deteriorating mining conditions and ore quality, to involve new, currently unprofitable mineral deposits into development.*

Традиционно к основным факторам производства относят природные, капитальные и трудовые ресурсы. В последнее время в качестве четвёртого фактора принято выделять предпринимательскую активность, которая, в свою очередь, может рассматриваться как одна из функций трудовых ресурсов. Кроме того, научно-технический прогресс рассматривается как самостоятельный фактор производства и как способ увеличения факторов производства в ряде моделей экономического роста. Это связано с тем, что научно-технический прогресс оказывает влияние на все элементы производительных сил: трудовые ресурсы, средства и предметы труда, способы организации и управления производством. Предполагалось, что в результате действия научно-технического прогресса влияние природно-ресурсного фактора на мировую экономику будет ослабевать. Но в реальности всё оказалось не так однозначно. Новые технологии, с одной стороны, запустили тренд на ресурсосбережение, включая технологии замкнутого цикла и комплексного использования полезных ископаемых, с другой стороны, потребовали увеличения объёма добываемых полезных ископаемых или вовлечения в освоение новых, не используемых ранее видов минерального сырья. В результате можно констатировать, что до настоящего момента времени развитие мировой экономики сопровождалось ростом производства и потребления минеральных ресурсов с темпом, опережающим рост численности населения планеты.

Неприятность заключается в том, что минерально-сырьевые ресурсы являются невозобновляемыми, и такой тип экономического роста не может длиться вечно. Но как долго он вообще возможен? В настоящее время распространены две точки зрения на проблему исчерпаемости запасов полезных ископаемых. Странники первого подхода [1–5], основываются на фундаментальном представлении о том, что ресурсы ограничены и конечны. Согласно этой концепции, доступность минеральных ресурсов описывается пиковыми моделями, впервые предло-

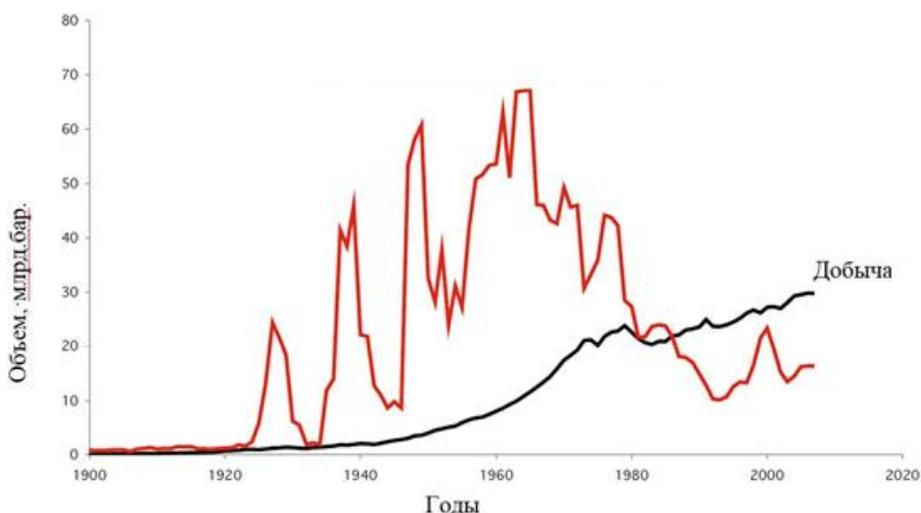
женными Hubbert [6, 7], и иллюстрируется с помощью “колоколообразных кривых”, где максимальный уровень добычи достигается при извлечении примерно половины известных запасов. Модели пиков изначально использовались для оценки динамики извлекаемых объемов нефти, в дальнейшем — для прогнозирования темпов истощения запасов других энергетических ресурсов и твёрдых полезных ископаемых. Модифицированная модель К. Хабберта была использована в работах отечественных ученых [8–11] для оценки перспектив ядерной энергетики в условиях исчерпания традиционных энергетических ресурсов. Исследования динамики добычи большей части твёрдых полезных ископаемых были выполнены шведским учёным Н.У. Sverdrup [12]. В результате моделирования оценивалось наличие пиков в производстве, рассчитывались сроки их достижения и, соответственно, моментов начала истощения запасов большинства стратегически важных металлов. Было установлено, что для многих видов твёрдых полезных ископаемых пиковые значения добычи уже пройдены.

Аргументы противников изложенного выше подхода сводятся к тому, что не все запасы ещё разведаны, а их часть, не извлекаемая в настоящий период, с течением времени может оказаться пригодной к использованию. В рамках второго подхода принято считать, что минеральные ресурсы ограничены, скорее, в силу влияния экономических факторов, нежели физических объёмов. С этой точки зрения, поскольку проблема истощения запасов заключается не в их физической доступности, то решить её можно с помощью научно-технического прогресса [13–15], обеспечивающего приемлемое соотношение между приростом объёмов минеральной продукции и издержек на её производство.

Таким образом, уровень воспроизводства минерально-сырьевой базы зависит как от темпов и результативности геологоразведочных работ, так и от темпов научно-технического прогресса в области разведки, добычи и переработки минерального сырья

Процесс геологического изучения недр обладает рядом специфических особенностей. К ним относятся: высокая стоимость проведения геологоразведочных работ; значительная продолжительность стадий геологоразведочных работ (сроки до вовлечения месторождения в эксплуатацию могут достигать десятков лет); вероятностный характер результатов работ; цикличность инвестиционных процессов в отрасли, связанная с волатильностью конъюнктуры сырьевых рынков. Влияние этих факторов со временем только усиливается: сокращается число открытий новых месторождений полезных ископаемых, особенно крупных; для новых месторождений характерно низкое качество запасов и ухудшающиеся условия разработки; темпы воспроизводства отстают от темпов выбытия производственных мощностей для многих видов полезных ископаемых. Например, для нефти темпы выбытия мощностей оцениваются 10–15% в год [16], а более половины поставляемой на мировой рынок традиционной нефти добывается из месторождений с падающей добычей. При этом многие эксперты сходятся во мнении, что нетрадиционная нефть не сможет восполнить дефицит предложения.

Рисунок иллюстрирует соотношение вновь открываемых запасов и объёмов производства нефти в мире. Усугубляет ситуацию на мировом нефтяном рынке и проявившаяся в последнее время тенденция общего снижения инвестиций в поиски и разведку энергетических ресурсов в связи с декларированием перехода к использованию возобновляемых источников энергии.



Динамика открытия новых месторождений и производства нефти (включая сырую нефть, конденсат, сжиженный нефтяной газ, тяжёлую нефть и нефть, добываемую из битуминозных песков) [17]

Как уже было сказано выше, второй особенностью воспроизводства минерально-сырьевой базы в современных условиях является резкое ухудшение качества и условий разработки открываемых месторождений, что приводит к существенному росту себестоимости производства минеральной продукции. Для нефтяного рынка это происходит за счёт увеличения доли шельфовых и арктических месторождений традиционной нефти, нефти глубоких горизонтов и слабопроницаемых пород, тяжёлой нефти, нефти, добываемой из битуминозных песчаников и горючих сланцев, жидких углеводородов из природного газа, в том числе из сланцевого газа и т.д.

Аналогичная ситуация наблюдается и с воспроизводимыми в процессе геологоразведочных работ запасами твёрдых полезных ископаемых. Отечественные и зарубежные данные свидетельствуют о кратном снижении качества добываемых руд. С 1920-х по 1970-е годы среднее содержание металла в руде снизилось: для меди с 2,1 до 0,6%, свинца — с 2,7 до 0,6%, цинка — с 4,6 до 4%, олова — с 1,2 до 0,4% [18]. Среднее содержание золота во всех видах обрабатываемых запасов Якутии снизилось в 2–2,5 раза в 1970–1990 гг. Если в 1940 г. в Кривбассе добывали руды с содержанием железа 62–67%, то уже в 1960-е годы все ГОКи этого бассейна проектировали на руды с содержанием железа всего 32–37% [19]. Бортовое содержание  $P_2O_5$  снизилось с 18% (1930-е годы) до

4% (1980-е годы), а среднее содержание  $P_2O_5$  в добываемых рудах АО “Апатит” снизилось с 23% в 1950 г. до 12,5% в 2014 г. [20]. Содержание основных ценных компонентов в добываемой руде на медно-колчеданных месторождениях Южного Урала с 1960 по 2010 г. снизилось: для меди в 2,6 раз; цинка, золота и серебра в 3,1, 2 и 1,5 раза, соответственно [21]. Это мировая тенденция. За последние 10 лет среднее содержание золота в разведанных запасах Канады уменьшилось на 35%. При этом среднее содержание золота в добываемой руде уменьшилось на 31% [22]. Среднее содержание меди в разрабатываемых медно-порфировых месторождениях США снизилось с 2 до 0,5% за последние 100 лет [23]. Наряду со снижением качества добываемых руд ухудшаются условия разработки месторождений полезных ископаемых: увеличивается глубина разработки, усложняются климатические и горно-геологические условия освоения месторождений, увеличиваются объёмы извлекаемой горной массы. Это приводит к снижению эффективности разработки месторождений. По некоторым оценкам, за последнее десятилетие капитальные затраты в минерально-сырьевом секторе выросли на 33%, эксплуатационные расходы — на 90%, а рентабельность горнодобывающих компаний снизилась более чем на 28% [24].

Достижения научно-технического прогресса позволили в значительной степени нивелировать снижение эффективности горного производства. В 80-е годы прошлого столетия удалось существенно снизить затраты на добычу и переработку минерального сырья за счёт широкого внедрения передовых технологий взрывания горной массы, внутрикарьерного дробления, более производительных видов оборудования, автоматизации процессов добычи и переработки сырья, новых методов обогащения полезных ископаемых. К настоящему времени возможности сокращения производственных затрат за счёт внедрения новых технических и технологических решений ограничены. Это связано с тем, что темпы научно-технического прогресса в горнодобывающей отрасли, как правило, невелики и крайне неравномерны во времени.

В современных условиях перспективы развития добычной отрасли и повышения уровня конкурентоспособности горнодобывающих предприятий в основном связывают с цифровизацией. Однако и в этом направлении специфика отрасли накладывает ряд ограничений на масштабы использования информационных технологий. Горнодобывающая промышленность является сегодня, пожалуй, одной из наиболее консервативных отраслей экономики. Темпы научно-технического прогресса здесь одни из самых низких. Это хорошо видно на примере внедрения цифровых технологий. По имеющимся данным цифровые технологии используются в среднем лишь в 50% процессов мировой добычи и переработки минерального сырья. А в развивающихся странах, где сырьевые отрасли часто составляют основу экономики, эта доля не превышает 25% [25]. Подход к использованию цифровых технологий в минерально-сырьевом секторе носит на сегодняшний день, скорее, фрагментарный характер. Этому способствует ряд причин, среди которых и высокая капиталоемкость производства, и нехватка подготовленных кад-

ров, и, как следствие, отсутствие представлений о первоочередных направлениях информатизации производственных процессов, стратегии ее развития и возможностях интеграции в целостную систему управления производством.

Тем не менее, почти для всех основных производственных процессов добычи и переработки минерального сырья уже сегодня имеются решения на базе использования цифровых технологий и методов искусственного интеллекта. На многих отечественных горнодобывающих предприятиях уже реализованы информационные технологии, направленные на оптимизацию режимов работы оборудования. В первую очередь, это касается системы грузоперевозок. Системы диспетчеризации позволяют осуществлять эффективное распределение транспорта в режиме реального времени, контролировать состояние водителей и дорог, следить за своевременностью заправок и расходом топлива, выполнять диагностику шин, двигателей и узлов автосамосвалов, планировать сроки технического обслуживания оборудования и др. Для железнодорожного транспорта предусмотрена возможность отслеживания маршрутов движения составов и числа загруженных думпкаров; погрузки и выгрузки, простоев и расхода топлива тепловозами; наблюдения за скоростными режимами поездов и др. [26].

Для буровзрывных работ реализована возможность самостоятельного наведения буровых станков, отслеживания параметров бурения в реальном времени, что позволяет при необходимости своевременно корректировать процесс бурения [**Ошибка! Залка не определена.**].

В мировой практике интенсивно развивается автоматизация и роботизация процессов добычи полезных ископаемых. Внедрение дистанционно управляемого и полностью роботизированного горнотранспортного оборудования на отечественных предприятиях минерально-сырьевого комплекса заметно отстаёт от темпов его использования за рубежом, где уже имеются примеры реализации “интеллектуального рудника” с осуществлением безлюдной выемки [27].

Всё чаще маркшейдерское сопровождение горных работ на отечественных горнодобывающих предприятиях осуществляется с использованием беспилотных летательных аппаратов. На основании аэрофотосъёмки выполняются замеры горных выработок. С помощью дронов осуществляется мониторинг сдвижения и деформаций откосов бортов и уступов карьеров [28, 29].

Сравнительно редкими сегодня примерами цифровизации в российской добычной отрасли характеризуется мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьера с использованием георадаров [30]. Хотя перспективы в этой области достаточно большие, благодаря высокой технологичности, точности, оперативности метода, а также потенциальным эффектам от повышения безопасности ведения работ и предотвращения убытков, возникающих при ликвидации последствий обрушения массивов горных пород.

Если реализация подавляющего большинства цифровых технологий на горных предприятиях, в том числе, перечисленных выше, связана

со значительными затратами, то для процессов переработки минерального сырья уже сегодня предлагаются очень дешевые и эффективные решения. Только за счёт анализа данных и улучшения прогнозных моделей затраты на реагенты могут быть значительно сокращены [31]. Поскольку химические реагенты, используемые в процессах обогащения полезных ископаемых, часто являются достаточно агрессивными, тем самым достигается еще и снижение экологического ущерба.

Цифровые технологии уже сегодня имеют более широкие области применения при добыче и переработке минерального сырья и не ограничиваются перечисленными выше. Если же говорить о более отдалённых перспективах использования искусственного интеллекта и машинного обучения, то они, скорее всего, будут связаны с автоматизированными поисками и разведкой месторождений полезных ископаемых [32].

Определить количественно эффект от роботизации и анализа больших данных применительно к горнодобывающим предприятиям в настоящий момент сложно. Ещё сложнее оценить потенциал цифровых технологий и методов искусственного интеллекта в решении проблемы расширения минерально-сырьевой базы. Но для процессов диспетчеризации и оптимизации производственных процессов оценки, а где-то и фактические данные, об эффективности их реализации уже имеются [33]:

- 1) оптимизация загрузки транспортного оборудования — 8%;
- 2) увеличение ходимости шин на 7–15%;
- 3) экономия топлива до 10%;
- 4) увеличение производительности перевозок на 12%;
- 5) увеличение коэффициента технической готовности на 4%;
- 6) увеличение коэффициента использования пробега на 8%;
- 7) увеличение производительности парка горных машин за счёт оптимизации грузоперевозок — 10–15%;
- 8) повышение производительности буровых станков на 15–20%;
- 9) снижение себестоимости буровзрывных работ на 2–7%.

Имеются также разрозненные данные об эффективности использования отдельных информационных технологий на отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятиях. Так, например, внедрение автоматизированных систем управления позволило отечественным предприятиям увеличить производительность горнотранспортного оборудования на 5–20%, при этом снизив затраты на его эксплуатацию на 7%, кроме того, сократить потребление электроэнергии на 2% [34]. За рубежом, где накоплен значительный опыт использования цифровых технологий, повышение производительности оборудования составило 15–25%, а сокращение расходов на транспортирование руды — 15% [Ошибка! Залка не определена., 35].

Основываясь на приведённых выше данных, можно попытаться очень укрупненно оценить вклад информационных технологий в снижение расходов горнодобывающих предприятий. В структуре себестоимости добычи твёрдых полезных ископаемых, в зависимости от вида минерального сырья, затраты на транспортирование горной массы дости-

гают 50–70% от затрат на горные работы (до 20–40% общих затрат); затраты на электроэнергию составляют 3–15% полной себестоимости. Затраты на буровзрывные работы достигают 25% себестоимости добычи полезных ископаемых. Таким образом максимальный эффект от локального применения цифровых технологий в отдельных производственных процессах сводится к сокращению текущих затрат на добычу и переработку минерального сырья на 0,5–6%. Это не много. Но для запасов, находящихся сегодня на грани рентабельности, снижение себестоимости продукции на такую величину вполне может оказаться достаточным для их перевода в разряд доступных. В целом же это свидетельствует о том, что использование цифровых технологий на уровне отдельных процессов добычи и переработки минерального сырья не позволяет компенсировать непрерывно ухудшающиеся во времени условия разработки и качество добываемого сырья. Представляется наиболее вероятным, что только интеграция цифровых технологий отдельных производственных процессов в целостную систему управления производством, совместно с реализацией потенциала методов искусственного интеллекта и машинного обучения в процессах автоматизированного поиска и разведки месторождений полезных ископаемых могут снизить остроту проблемы воспроизводства истощающейся минерально-сырьевой базы.

#### *Список источников*

1. Prior T., Giurco D., Mudd G. [et al.]. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management // *Global Environmental Change*. 2012. Vol. 22. Issue 3, pp. 577–587. — DOI 10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009.
2. Ali S.H., Giurco D., Arndt N. [et al.]. Mineral supply for sustainable development requires resource governance // *Nature*. 2017. Vol. 543, pp. 367–372. — DOI 10.1038/nature21359.
3. Northey S., Mohr S., Mudd G.M. [et al.]. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining // *Resources, Conservation and Recycling*. 2014. Vol. 83, pp. 190–201. — DOI 10.1016/j.resconrec.2013.10.005.
4. Calvo G., Valero Al., Valero An. Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources // *Resources, Conservation & Recycling*. 2017. Vol. 125, pp. 208–217. — DOI 10.1016/j.resconrec.2017.06.009.
5. Chapman I. The end of Peak Oil? Why this topic is still relevant despite recent denials // *Energy Polic.* 2014. Vol. 64, pp. 93–101. — DOI 10.1016/j.enpol.2013.05.010.
6. Hubbert M.K. Nuclear Energy and Fossil Fuels 95 // Shell Development Company Publication, 1956, pp. 40.
7. Hubbert, M.K. Energy Resources: A Report to the Committee on Natural Resources // National Academy of Sciences. 1962. 141 p.
8. Ульянин Ю.А., Харитонов В.В., Юршина Д.Ю. Перспективы ядерной энергетики в условиях исчерпания традиционных энергетических ресурсов // *Вестн. НИЯУ МИФИ*. 2017. № 4. С. 5–16.

9. Харитонов В.В., Кабашев К.В., Маликов Р.Р. Долгосрочные тренды истощения традиционных энергетических ресурсов и перспективы ядерной энергетики. — М.: НИЯУ МИФИ, 2016. — 96 с.
10. Ульянов Ю.А., Харитонов В.В., Стоянов А.Д. Сценарии развития мировой ядерной энергетики в условиях ограниченности ископаемых ресурсов // Экономические стратегии. 2021. № 3. С. 24–31. — DOI 10.33917/es-3.177.2021.24-31.
11. Харитонов В.В., Кабашев К.В., Курельчук У.Н. Оценка пика добычи урана // Горный журнал. 2014. № 4. С. 44–50.
12. Ragnarsdottir K.V., Sverdrup H.U., Koca D. Assessing long term sustainability of global supply of natural resources and materials // Sustainable Development. 2011. Chapter X, pp. 20–46.
13. Tilton J.E., Lagos G. Assessing the long-run availability of copper // Resources Policy. 2007. Vol. 32. Issues 1–2, pp. 19–23. — DOI 10.1016/j.resourpol.2007.04.001.
14. Mudd G.M., Jowitt S.M. Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply // Economic Geology. 2018. Vol. 113 (6), pp. 1235–1267. — DOI: 10.5382/econgeo.2018.4590.
15. Bardi U. Peak oil, 20 years later: Failed prediction or useful insight? // Energy Research & Social Science. 2019. Vol. 48, pp. 257–261. — DOI 10.1016/j.erss.2018.09.022.
16. The Peak Oil Market // Deutsche Bank FITT Research, 2009. — URL: <https://iconnect.insead.edu/IAA/GBR/groups/energy/Documents/DB%20Peak%20oil%20oct09.pdf> (дата обращения: 10.08.2022).
17. Global Oil Depletion. An assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production // UK Energy Research Centre, 2009. — 200 p. — URL: <http://www.ukerc.ac.uk/support/tiki-index.php?page=TPA%20Overview> (дата обращения: 22.03.2020).
18. Попов В.Ф., Толстихин О.Н. Общая экология: электронное учеб. пособие. — URL: <https://kpfu.ru/portal/docs/F1837030346/ekologiya.pdf> (дата обращения: 12.10.2022).
19. Шапарь А.Г., Копач П.И. Исчерпаемость минеральных ресурсов, целесообразность и условия их ввода в эксплуатацию // Открытые горные работы. 2000. № 4. С. 57–62.
20. Чмыхалова С.В. Влияние снижения качества и изменчивости руды на ресурсно-экологические показатели горного производства (на примере АО “Апатит”) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 73–80.
21. Пешков А. М. Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: дисс. ...канд. техн. наук. — М., 2014. — 160 с.
22. Качество золотой руды стремительно сокращается // Goldena: интернет-журнал о золоте. 2015. — URL: <https://goldena.ru/news/kachestvo-zolotoj-rudy-stremitelno-sokrashaetsya> (дата обращения: 12.10.2022).
23. Copper // Technology and Competitiveness. — URL: <http://www.wws.princeton.edu/cgi-bin/byteserv.prl/~ota/disk2/1988/8808/8808.pdf> (дата обращения: 02.10.2019).
24. Durrant-Whyte H., Geraghty R., Pujol F. [et al.]. How digital innovation can improve mining productivity // McKinsey. — URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metalsand-mining/our-insights/how-digital-innovation-can-improve-mining-productivity#> (дата обращения: 02.10.2019).

25. “ВИСТ ГРУПП” и “ЦИФРА” разработают искусственный интеллект для горной добычи // Горная промышленность. 2018. — URL: <http://www.mining-portal.ru/news/allnews/vist-grupp-i-tsifra-razrabotayut-iskusstvennyiy-intellekt-dlya-gornoj-dobyichi/> (дата обращения: 13.12.2019).
26. Система диспетчеризации “карьер”: от мониторинга большегрузных автосамосвалов к управлению горнотранспортным комплексом и оптимизации горных работ в карьере // Горная промышленность. 2004. — URL: <http://mining-media.ru/ru/article/ogr/1379-sistema-dispet> (дата обращения: 12.10.2022)
27. Опарин В.Н., Русин Е.П., Тапсиев А.П. [и др.]. Мировой опыт автоматизации горных работ на подземных рудниках. — Новосибирск: СО РАН, 2007. — 99 с.
28. Дроны в карьере // Ведомости. 2019. № 59. — URL: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2019/12/06/817974-droni-karer> (дата обращения: 12.10.2022).
29. “Севералмаз” использует дроны для маркшейдерских работ и геосъемок // YKTIMES.RU. 2018. — URL: <https://www.yktimes.ru/новости/severalmaz-ispolzuet-dronyi-dlya-marksheyderskih-rabot-i-geosyomok/> (дата обращения: 12.10.2022).
30. Коли Н., Райх У. Мониторинг в реальном времени устойчивости бортов конечных границ карьера с помощью усовершенствованной радиолокационной технологии // Горное дело. — URL: <https://www.mwork.su/progresivnye-tehnologii/880-monitoring-v-real-nom-vremeni-ustojchivostibortov-konechnyh-granic-kar-era-s-pomoshchyu-usovershenstvovannoj-radiolokacionnoj-tehnologii> (дата обращения: 12.10.2022).
31. The fourth industrial revolution: bringing AI to mining // Yandex Data Factory. — URL: <https://www.mining-technology.com/features/fourth-industrial-revolution-bringing-ai-mining/> (дата обращения: 12.10.2022).
32. Роботизированные карьеры и шахты: будущее промышленности // Популярная механика. 2010. № 7 (93). — URL: <https://www.popmech.ru/vehicles/10522-nechelovecheskiy-faktorroboty/> (дата обращения: 13.12.2019).
33. Клебанов Д.А. Проблемы цифровой трансформации угледобывающей промышленности в России и мире. — URL: [https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/10/25/12815/4\\_3\\_5\\_Tehnologii\\_industrii\\_4.pdf](https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/10/25/12815/4_3_5_Tehnologii_industrii_4.pdf) (дата обращения: 12.10.2022).
34. Клебанов Д. Интеллектуальный Карьер // Автоматизированная система управления горно-транспортным комплексом “Карьер” (АСУ ГТК). — URL: <https://docplayer.ru/38239271-Intellektualnyy-karer-avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-gorno-transportnym-kompleksom-karer-asu-gtk.html> (дата обращения: 13.12.2019).
35. Автономные поезда Rio Tinto // MetalsExpert. — URL: <https://metals-expert.com/news/mining/234.htm> (дата обращения: 03.06.2021).

#### Сведения об авторах / About authors

**Мацко Наталья Аркадьевна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института системного анализа РАН, Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской академии наук. 117312, Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 9, ORCID: 0000-0001-8690-5369. E-mail: [matsko@inbox.ru](mailto:matsko@inbox.ru)

*Natalia A. Matsko*, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center «Informatics and Manage-

ment» of Russian Academy of Sciences, Bld. 9, prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, Russia 117312. ORCID: 0000-0001-8690-5369. E-mail: [matsko@inbox.ru](mailto:matsko@inbox.ru).

**Харитоновна Маргарита Юрьевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института химии и химической технологии СО РАН, Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”. 660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/24. ORCID: 0000-0001-6768-6754. E-mail: [margaret.ok@yandex.ru](mailto:margaret.ok@yandex.ru)

*Margarita Yu. Kharitonova*, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”. Bld. 50/24, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, Russia, 660036. ORCID: 0000-0001-6768-6754. E-mail: [margaret.ok@yandex.ru](mailto:margaret.ok@yandex.ru).