

К ВОПРОСАМ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ ГОРНОДОБЫВАЮЩИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

О. В. Наговицын¹, М. Г. Возняк¹

¹ Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Аннотация: В горной промышленности наблюдается рост применения цифровых технологий, это отражается в первую очередь на полной или частичной автоматизации управления отдельными машинами – автосамосвалами, экскаваторами, буровыми установками, дронами технологического мониторинга и др. Основной причиной этого является повышение эффективности производства и возможность исключить людей из мест с опасными условиями труда. Некоторые производители создают концепты оборудования, направленные на полное исключение человека из производственного процесса. Управление таким оборудованием основывается на системе спутникового позиционирования и беспроводных сетях передачи данных. Очевидно, что применение роботизированной техники может оказать значительное влияние на технологию горного производства. Однако для наиболее полного использования всех преимуществ роботизированного оборудования необходимо разрабатывать и внедрять автоматические системы управления производством. Проведен анализ современных систем автоматизированного проектирования, подготовки производства и инженерного анализа. Выявлены изменения в структуре управления роботизированным горным предприятием. Определена взаимосвязь планирования и управления горными работами. Составлена обобщенная схема обмена данными в роботизированной системе.

Ключевые слова: роботизированная система, автоматизированная система, управление горным предприятием, планирование, проектирование горных работ, киберфизическая система, роботизированное управление, человеческий фактор, обмен данными, структура управления горным предприятием.

Для цитирования: Наговицын О. В., Возняк М. Г. К вопросам управления роботизированным горнодобывающим предприятием // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 326–335. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

Robotic mine management

O. V. Nagovitsyn¹, M. G. Voznyak¹

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: The mining industry features an increasing use of digital technologies, first of all, in total or partial automation of control system for machines—dump trucks, excavators, drilling rigs, process monitoring drones, etc. The main objective is to prevent mine personnel from operation in hazardous working conditions and to enhance efficiency of production. Some manufacturers create concept equipment designs toward completely unmanned operation.

The control of such equipment is based on the satellite positioning system and wireless data transmission networks. The use of robotic technology can significantly improve mining. However, for the fullest use of all the advantages of robotic equipment, it is necessary to develop and implement automatic production control systems. This article analyzes modern systems of automated design, production preparation and engineering analysis. The changes in the management structure of a robotic mine are revealed. The relationship between mine planning and management is determined. A generalized data exchange scheme in a robotic system is composed.

Key words: robotic system, automated system, mine management, mine planning and design, cyber-physical system, robotic control, human factor, data exchange, mine management structure.

For citation: Nagovitsyn O. V., Voznyak M. G. Robotic mine management. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):326–335. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

Введение

В настоящее время наблюдается взрывной рост применения цифровых технологий практически во всех областях человеческой деятельности. Горная индустрия не стала исключением, сейчас горные работы проходят новый этап своего развития, обусловленный внедрением дистанционно управляемой и роботизированной техники практически во все технологические процессы добычи ПИ [1, 2]. Основными движущими факторами этого перехода являются повышение эффективности производства и возможность удалить человека из мест с опасными условиями труда. Внедряется автоматизированное управление отдельными машинами, например автосамосвалами, экскаваторами, буровыми установками, дронами технологического мониторинга [3]. Сейчас такими разработками занимаются крупные производители горного и транспортного оборудования, постепенно роботизируя отдельные технологические процессы [4–7]. Небольшие фирмы (стартапы) предлагают новые, иногда революционные идеи и концепты устройств и машин, помогающих совершенствованию отдельных рабочих операций и процессов. Автоматизированными системами управле-

ния горного производства (рудника, шахты, карьера, разреза) занимаются компании-разработчики систем диспетчеризации и АСУТП. Сущность этих систем заключается в управлении горно-транспортными машинами через беспроводную сеть передачи данных с помощью контроллеров, установленных на борту мобильного оборудования. Используются системы высокоточного глобального спутникового позиционирования, обнаружения препятствий и предотвращения столкновений. Сейчас такие системы в автоматизированном режиме (с участием человека) используют анализ и обработку данных, поступающих из различных источников, для выработки управляющих воздействий на производственные участки и непосредственного управления машинами, что обеспечивает выполнение плановых производственных показателей и безопасность работ всего производственного цикла. Уже сейчас видно, что применение роботизированной техники может оказать значительное влияние на технологию горного производства, но, чтобы добиться наиболее полного использования преимуществ горных роботизированных комплексов, необходимо разрабатывать и внедрять автоматические системы управ-

ления производством, включающие в себя подсистемы проектирования, планирования и управления горными работами.

Современные системы автоматизированного проектирования, планирования и управления горными работами

Для управления горным предприятием в настоящее время требуется организовать работу ряда отделов и подразделений, решающих множество производственных задач. Типичная структура управления современным горным предприятием в общем виде приведена на рис. 1.

Сейчас, автоматизацию работы такой структуры обеспечивают корпоративные системы ERP, горно-геологические системы (ГГИС), системы

диспетчеризации, системы управления производством (MES). С их помощью производится сбор и обработка первичных данных, управление ресурсами, финансами и кадрами, создание моделей геологической среды и выработанного пространства, генерация чертежей, имитационного моделирования технологических процессов, планирования и выдачи управляющих воздействий на участки ведения горных работ.

Такие комплексы (в горной части производства) решают следующие задачи: обработка первичной графической — геодезической, маркшейдерской и геологоразведочной документации; проектирование выработок; моделирование опробования; проектирование буровзрывных работ; проектирование насыпных сооружений; построение графических документов в стандартах



Рис. 1. Упрощенная структура управления горным предприятием
Fig. 1. Simplified mining enterprise management structure

горной графики, т. е. разрезов, планов, профилей и пр.; планирование горных работ для любых временных периодов; автоматизированное управление технологическими процессами (диспетчеризация); геологическое, гидрогеологическое и геомеханическое моделирование; оптимизация границ карьеров; определение параметров системы разработки; горно-геометрический анализ карьерных полей; моделирование систем вентиляции подземных рудников и аэрологические расчеты состояния атмосферы карьеров; моделирование процессов взрывного разрушения горных пород; моделирование выпуска руды; имитационное моделирование технологических процессов и их совокупностей [8].

Симбиоз и взаимопроникновение таких систем, объединение их в сложные программно-аппаратные комплексы создают предпосылки для создания роботизированной технологии разработки месторождений, которая на основе обработки внешних и внутренних потоков данных будет автоматически управлять множеством взаимосвязанных сложных процессов добычи полезных ископаемых.

Структура системы управления роботизированным горнодобывающим предприятием

Роботизированная технология разработки месторождений добычи полезных ископаемых — совокупность технических, программных, методических и организационных средств, обеспечивающая автоматический связный цикл проектирования, планирования, управления и производства горных работ.

Очевидно, на полностью роботизированном производстве современная структура управления (рис. 1) претерпит значительные изменения, так, например, не будет необходимости в организации функциональных служб

и производственных участков, их функции могут быть выполнены автоматически по данным, получаемым от систем управления и мониторинга технологических процессов. Для наблюдения за функционированием предприятия необходимо будет организовать систему производственного контроля, эта система будет отслеживать ход выполнения производственных процессов и предоставлять необходимые данные о динамике их показателей, состоянии выработанного пространства, сопутствующей инфраструктуры и пр., формируя связную совокупность киберфизических систем и цифровых двойников объектов и процессов горного производства.

Переноса на горное производство общие технологические предпосылки появления киберфизических систем (КФС) [9—11], можно выделить следующие этапы их формирования:

1. Увеличение количества устройств со встроенными процессорами и системами хранения данных: сети мониторинга геомеханических, аэрологических параметров; горное оборудование с микроконтроллерами управления отдельными подсистемами; маркшейдерские и геологические приборы для съемки и опробования и т. д.

2. Интеграция, позволяющая добиться большего эффекта методом объединения ряда отдельных компонентов в единую систему: промышленный интернет вещей — системы диспетчеризации и мониторинга горно-транспортного оборудования; сети интеллектуальных сенсоров; умные среды горного предприятия.

3. Учет ограничений когнитивных способностей человека, которые эволюционируют медленнее, чем машины. С одной стороны, последует вывод человека из контуров управления горным предприятием. С другой, — усиление

ние аналитических способностей человека и создание интерактивных систем нового уровня, сохраняющих человека в контуре управления на высших уровнях. Роботизированная технология разработки месторождений добычи полезных ископаемых.

Таким образом, начиная со второго, а в основном, на третьем этапе, проектирование, планирование, управление горными работами, мониторинг природных и техногенных процессов, собственно, технические средства будут представлять собой единую роботизированную систему, автоматически адаптирующуюся к изменяющимся горно-геологическим и горно-техническим условиям по мере развития горных работ, реализуя комплекс *цифровых двойников* объектов и процессов горной технологии.

С помощью сетей передачи данных собранная информация поступает в систему, за счет чего служба производственного контроля с помощью средств «умной» аналитики может прогнозировать развитие горных работ как на стратегические периоды, так и в краткосрочной перспективе, проводить исследования — «что — если», чтобы понимать влияние потенциальных изменений внешних и внутренних условий в бизнес-стратегии освоения запасов месторождения. Предикативная аналитика, интеллектуальный анализ данных, анализ больших данных и машинное обучение — некоторые из аналитических категорий, относящихся к средствам «умной» аналитики.

Роботизированное управление технологическими процессами и в целом горным предприятием исключит воз-

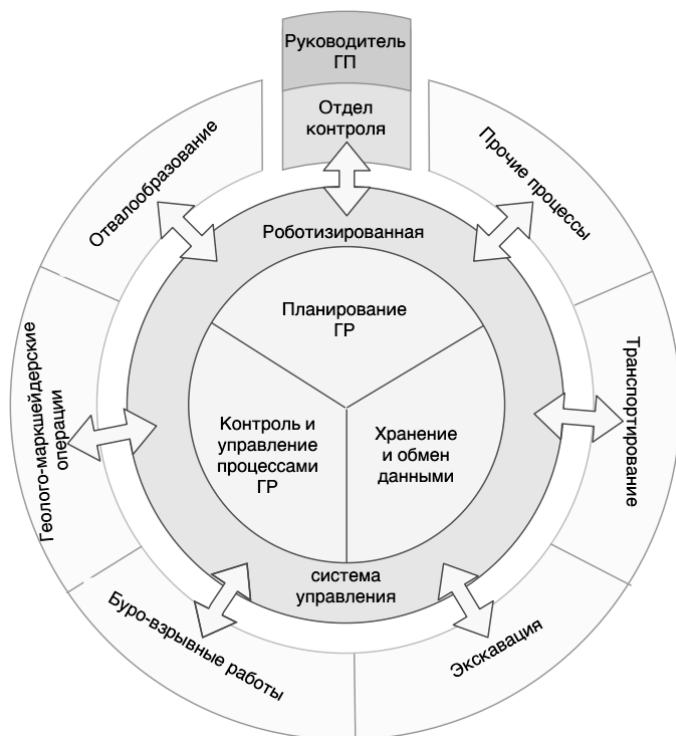


Рис 2. Общая структура управления роботизированным горным предприятием
Fig 2. General management structure of a robotic mining enterprise

действие человеческого фактора на процессы планирования, проектирования и управления горными работами, значительно ускорит эти процессы и выберет оптимальный вариант развития горных работ. Предполагаемая структура управления роботизированным горным предприятием приведена на рис. 2.

На уровне планирования горных работ роботизированная система выполняет связный комплекс взаимосвязанных по плановым показателям работ по перспективному календарному планированию, годовому, квартальному и месячному периодам. Возможно, значимость календарных периодов планирования потеряет актуальность, и необходимо будет рассматривать «монолитную» технологию планирования, которая, с одной стороны, будет направлена на достижение стратегических целей освоения месторождения, а с другой — на решение оперативных задач, обеспечивающих

текущую эффективность добычи ПИ. Такая технология должна учитывать и прогнозировать максимум доступных данных, как внешних по отношению к горному предприятию (состояние рынков минерального сырья, энергетических ресурсов, машин и материалов, прогноз развития потребностей в ПИ и цены на него, условия кредитования, социально-экономические и политические факторы и пр.), так и внутренних (финансовое состояние предприятия, состояние минерально-сырьевой базы и прогноз ее развития, горно-геологические и горно-технические условия, состояние парка техники и инфраструктуры). Это обуславливает появление источников неопределенности и рисков принятия решений при планировании (рис. 3).

Появление источников риска связано с достоверностью и вероятностным характером некоторых данных. Доступное оборудование, методы переработки и добычи в определенный период



Рис. 3. Некоторые источники риска в горных проектах
Fig. 3. Some sources of risk in mining projects

жизни горного проекта могут вызвать эксплуатационные проблемы. Экологические инциденты, решения руководства или операционной команды могут представлять определенный уровень риска для проекта [12, 13].

На этапе технико-экономического обоснования проводятся работы для определения факторов неопределенности и минимизации их влияния на принимаемые решения. Однако большая часть горного проекта сосредоточена на определении количественных факторов, таких как расчеты капитала и операционных расходов, а также прогнозы цен на сырьевые товары. Большинство финансовых исследований имеют тенденцию группировки всего риска в один коэффициент, который применяется к конечному результату. Хотя это действительно устраняет неопределенность в оценке, применяемые факторы, как правило, слишком консервативны и не позволяют оценить их влияние в динамике развития проекта освоения месторождения. Чаще всего это происходит за счет недоста-

точной надежности оценки наиболее критических внутренних источников неопределенности, относящихся к основным активам предприятия, инвестициям и ресурсам [14]. Специалисты по финансовой оценке и планированию горных проектов выполняют работу исходя (часто необоснованно) из предположения, что модель ресурсов является точной и надежной, и поэтому не уделяют должного внимания уровням неопределенности [15].

Роботизированная система исключает влияние человеческого фактора на процесс планирования горных работ, ее подсистемы смогут анализировать максимально доступное к оценке количество рисков, в результате будет получен действительно оптимальный план. Система на основе средств «умной» аналитики сможет автоматически разработать стратегию управления рисками, с помощью которой в случае их возникновения будут определяться приоритеты и порядок выполнения горных работ и приняты меры для снижения рисков до приемлемых уровней. Такая страте-

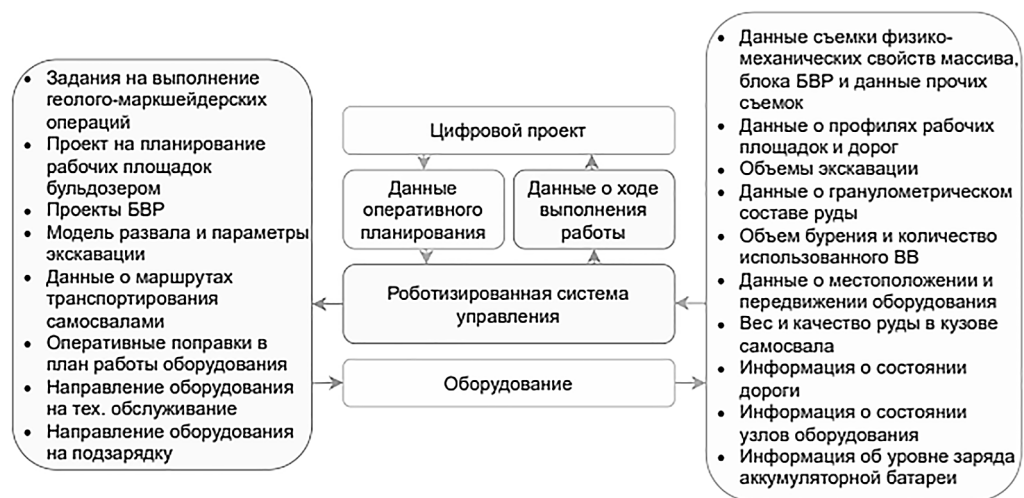


Рис. 4. Схема обмена данными в системе управления технологическими процессами роботизированного оборудования

Fig. 4. Scheme of data exchange in the control system of technological processes of robotic equipment

гия может быть оперативно изменена во время эксплуатации горного предприятия в случае возникновения новых, влияющих на нее критериев.

На уровне обмена и хранения информации роботизированная система осуществляет передачу данных цифрового проекта на горно-транспортное оборудование, получает данные о ходе работы и об изменениях рабочей среды, актуализирует дальнейшие цифровые проекты. Обобщенная схема обмена данными между оборудованием и системой управления приведена на рис. 4.

Вся полученная с оборудования информация служит исходными данными для осуществления контроля и управления горными работами. На этом уровне система вычисляет оптимальный вариант для решения производственных задач и обеспечивает бесперебойное взаимодействие оборудования в непрерывно изменяющихся условиях для достижения плановых показателей производства.

Заключение

В результате анализа структуры управления горным предприятием было выявлено, что функциональные

службы и отделы могут быть исключены за счет использования единой системы управления роботизированным горным предприятием, которая по данным, получаемым из технологического оборудования, способна автоматически выполнять их обязанности. Предложена структура управления роботизированным горным предприятием, исключающая воздействие человеческого фактора. Автоматизированная система, основанная на такой структуре, будет нацелена на выработку такой стратегии управления рисками, с помощью которой будут определяться приоритеты работ, и предприниматься меры для снижения рисков до приемлемых уровней. Такая стратегия может быть оперативно изменена во время эксплуатации горного предприятия в случае возникновения новых критериев, на нее влияющих. Планирование и управление горными работами будет представлять собой единую систему, автоматически изменяющуюся в зависимости от продвижения горных работ, реализуя таким образом совокупность киберфизических систем цифрового двойника, объектов и процессов горнодобывающего предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетняк С. П. Основные проблемы проектирования карьеров нового поколения // Записки горного института. — 2012. — с. 154–158.
2. Кубрин С. С. Автоматизированная система управления горным производством как платформа комплексирования технологических стадий и операций в единый технологический процесс // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 11. — С. 96–107.
3. Шевкун Е. Б. История горного дела: учеб, пособие // Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. — 2015. — 244 с.
4. Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная Промышленность. — 2020. — №1. — С.8
5. Бойко А. Добывающие компании и роботизация. Robotrends [электронный ресурс] — режим доступа: <http://robotrends.ru/robopedia/1711-dobyvayushie-kompanii-robotizaciya> (обращение: 24.01.2021)
6. Jian-guo Li, Kai Zhan, Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment, Engineering, Volume 4, Issue 3, 2018, Pages 381–391, ISSN 2095–8099, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.

7. Rogers, William & Kahraman, Melek & Drews, Frank & Powell, Kody & Haight, Joel & Wang, Yaxue & Baxla, Kritika & Sobalkar, Mohit. 2019. Automation in the Mining Industry: Review of Technology, Systems, Human Factors, and Political Risk. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 36 (9). <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0094-2>.

8. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы, область применения и особенности построения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 7. — С. 71–83

9. Киберфизические системы. К чему приведет слияние интернета людей, вещей и сервисов. Tadviser Robotrends [электронный ресурс] — режим доступа: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Киберфизические_системы_\(Cyber-Physical_System,_CPS\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Киберфизические_системы_(Cyber-Physical_System,_CPS)) (обращение: 24.01.2021)

10. Monostori, Laszlo & Kadar, Botond & Bauernhansl, Thomas & Kondoh, Shinsuke & Kumara, Soundar & Reinhart, Gunther & Sauer, Olaf & Schuh, Günther & Sihn, Wilfried & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 65. 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.

11. Matthias M. Herterich, Falk Uebernickel, Walter Brenner, The Impact of Cyber-physical Systems on Industrial Services in Manufacturing, *Procedia CIRP*, Volume 30, 2015, Pages 323–328, ISSN 2212–8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.110>.

12. Капустин Ю. Е. Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров). — СПб.: Недра, 2004. — 425 с.

13. Day D., Morley C., Snowden V., 1999. Financial impact of resource/reserve uncertainty. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, October-December 1999.

14. Кузнецова Н. В. Управление рисками: Учебное пособие. — Владивосток: ТИДОТ ДВГУ, 2004. — 168 с.

15. Заернюк В. М., Забайкин Ю. В., Сейфуллаев Б. М. Особенности проявления рисков и неопределенности при реализации горных проектов // KANT. — 2017. — №3. — С. 112–138. **МИАБ**

REFERENCES

1. Reshetnyak S. P. The main problems of designing open-pit mines of a new generation. *Zapiski gornogo instituta*. 2012. pp. 154–158. [In Russ]

2. Kubrin S. S. Automated control system of mining production as a platform for integrating technological stages and operations into a single technological process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016. no. 11. S. 96–107. [In Russ]

3. Shevkun E. B. *Istoriya gornogo dela: ucheb, posobie* [History of mining: textbook, manual]. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta. 2015. 244 p. [In Russ]

4. Klebanov A. F. Automation and robotization of open pit mining. *Gornaya Promyshlennost'*. 2020. no.1. p. 8 [In Russ]

5. Bojko A. *Dobyyvayushchie kompanii i robotizaciya. Robotrends* [Extractive companies and robotization. Robotrends] [elektronnyj resurs] rezhim dostupa: <http://robotrends.ru/robopedia/1711-dobyyvayushchie-kompanii-i-robotizaciya> (obrashchenie: 24.01.2021) [In Russ]

6. Jian-guo Li, Kai Zhan, Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment, *Engineering*, Volume 4, Issue 3, 2018, Pages 381–391, ISSN 2095–8099, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.

7. Rogers, William & Kahraman, Melek & Drews, Frank & Powell, Kody & Haight, Joel & Wang, Yaxue & Baxla, Kritika & Sobalkar, Mohit. 2019. Automation in the Mining Industry: Review of Technology, Systems, Human Factors, and Political Risk. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 36 (9). <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0094-2>.

8. Nagovicyn O. V., Lukichev S. V. Gorno-geologicheskie informacionnye sistemy, oblast' primeneniya i osobennosti postroeniya. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016. no. 7. pp. 71–83 [In Russ]

9. Kiberfizicheskie sistemy. *K chemu privedet sliyanie interneta lyudej, veshchej i servisov. Tadviser Robotrends* [Cyber-physical systems. What will the merger of the Internet of people, things and services lead to? Tadviser Robotrends] [elektronnyj resurs] rezhim dostupa: [www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Kiberfizicheskie_sistemy_\(Cyber-Physical_System,_CPS\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Kiberfizicheskie_sistemy_(Cyber-Physical_System,_CPS)) (obrashchenie: 24.01.2021) [In Russ]

10. Monostori, Laszlo & Kadar, Botond & Bauernhansl, Thomas & Kondoh, Shinsuke & Kumara, Soundar & Reinhart, Gunther & Sauer, Olaf & Schuh, Günther & Sihn, Wilfried & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 65. 621 – 641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.

11. Matthias M. Herterich, Falk Uebernickel, Walter Brenner, The Impact of Cyber-physical Systems on Industrial Services in Manufacturing, *Procedia CIRP*, Volume 30, 2015, Pages 323 – 328, ISSN 2212 – 8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.110>. [In Russ]

12. Kaputin Yu. E. *Informacionnye tekhnologii planirovaniya gornyh rabot (dlya gornyh inzhenerov)* [Information technologies for planning mining operations (for mining engineers)]. Saint-Petersburg: Nedra, 2004. 425 p. [In Russ]

13. Day D., Morley C., Snowden V., 1999. Financial impact of resource/reserve uncertainty. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, October-December 1999.

14. Kuznecova N. V. *Upravlenie riskami: Uchebnoe posobie* [Risk Management: A Study Guide]. Vladivostok: TIDOT DVGU, 2004. 168 p. [In Russ]

15. Zaernyuk B. M., Zabajkin Yu. V., Seifullaev B. M. *Osobennosti proyavleniya riskov i neopredelennosti pri realizacii gornyh proektov* [Features of the manifestation of risks and uncertainty in the implementation of mining projects]. *KANT*. 2017. no.3. pp. 112 – 138. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наговицын Олег Владимирович¹ – докт. техн. наук, зам. директора, O.Nagovitsyn@ksc.ru;

Возняк Мария Григорьевна¹ – инженер-исследователь, voznyak@mineframe.ru;

¹ Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Nagovitsyn O. V.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, O.Nagovitsyn@ksc.ru;

*Voznyak M. G.*¹, engineer-researcher, voznyak@mineframe.ru;

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 29.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 29.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

