



Особенности цифровизации и автоматизации подземной геотехнологии при переходе к роботизированным технологическим процессам на действующих рудниках

К.В. Барановский ☐, А.А. Рожков

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российской Федерации
✉ kartingist@list.ru

Резюме: Модернизация геотехнологии преследует цель повышения эффективности горных работ в соответствии с актуальными условиями действующего предприятия. В современных реалиях особенно актуальной является необходимость создания горнотехнических условий для эффективного использования средств цифровизации и внедрения автоматизации производственных процессов. Это, в свою очередь, требует совершенствования и адаптации конструкции и параметров систем разработки для применения роботизированного оборудования. При освоении рудником модернизированной геотехнологии, а также переходе к роботизированным технологическим процессам на действующих рудниках должен произойти качественный скачок технического прогресса при стабильности функционирования горнотехнической системы. Сама модернизированная геотехнология должна иметь способность оперативно адаптироваться к изменяющимся горно-геологическим и экономическим условиям освоения месторождения, сохраняя и повышая потенциал использования ранее применяемых технических решений, гармонично вписываясь в сложившиеся горнотехнические условия. Используя принципы комплементарного подхода к оптимизации параметров горнотехнической системы, модернизация геотехнологии позволит обеспечить комплексную стабильность функционирования предприятия, соответствие технических решений изменяющимся горно-геологическим и экономическим условиям освоения месторождений подземным способом.

В статье представлены технические решения при модернизации подземной геотехнологии на основе комплементарного подхода к взаимной оптимизации подсистем горнотехнической системы. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление причин и факторов, прямо или косвенно влияющих на эффективность освоения новых проектных решений, использующих средства цифровизации и роботизации в сложившихся условиях работы горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: горнотехническая система, модернизированная геотехнология, технологический процесс, цифровизация, роботизация, автоматизация, комплементарный подход

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00410-25-00. Г.р. №1022040200004-9-1.5.1. Тема 1 (2025–2027).

Для цитирования: Барановский К.В., Рожков А.А. Особенности цифровизации и автоматизации подземной геотехнологии при переходе к роботизированным технологическим процессам на действующих рудниках. *Горная промышленность*. 2025;(5S):64–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-64-68>

Specific features of digitalization and automation of underground mining systems in transition to autonomous technological processes in operating mines

К.В. Baranovsky ☐, А.А. Rozhkov

Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ kartingist@list.ru

Abstract: Modernization of mining systems is aimed at increasing the efficiency of mining operations in accordance with the current conditions of the operating mine. Currently, the need to create mining conditions for efficient use of digital tools and introduction of production process automation is especially urgent. This, in turn, requires improving and adapting the design

and parameters of mining systems for the use of autonomous equipment. When a mine develops an upgraded mining system as well as when switching to autonomous technological processes at operating mines, a quantum technical leap should take place regarding the stability of operating the mining system. The upgraded mining system itself needs to be able to quickly adapt to changing mining, geological and economic conditions of the deposit development, maintaining and increasing the potential for using previously applied technical solutions, harmoniously fitting into the existing mining conditions. Using the principles of a complementary approach to optimizing the parameters of a mining system, upgrading the mining system will ensure complex stability of the company's operation, and compliance of the technical solutions with the changing mining, geological, and economic conditions for underground mining of mineral deposits.

The article presents technical solutions for upgrading underground mining systems based on a complementary approach to mutual optimization of subsystems within the mining system. Further research will focus on identifying the causes and factors that directly or indirectly affect the efficiency of implementing new design solutions that utilize digitalization and autonomous operation tools in the current operating conditions of mining companies.

Keywords: mining system, upgraded mining system, technological process, digitalization, autonomous operation, automation, complementary approach

Acknowledgements: The research was performed within the framework of State Contract No.075-00410-25-00, Topic 1 (2025–2027).

For citation: Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Specific features of digitalization and automation of underground mining systems in transition to autonomous technological processes in operating mines. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):64–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-64-68>

Введение

Определяющую роль в обеспечении эффективности функционирования горнотехнической системы (ГТС) в динамике подземной разработки месторождения играет своевременная адаптация параметров геотехнологии к изменяющимся внешним и внутренним условиям.

Первоначальное обоснование технологических решений производят при разработке технико-экономического обоснования или технического проекта. Однако в процессе эксплуатации месторождения вследствие изменения горно-геологических, горнотехнических, экономических и экологических условий возникает необходимость пересмо-

тра проектных технико-технологических решений [1–4]. В первую очередь в части модернизации геотехнологии, которая преследует цель повышения эффективности горных работ в соответствии с актуализацией условий функционирования действующего предприятия [5].

Так, в ГТС при модернизации подземной геотехнологии на действующих рудниках проект и производственная подсистема должны быть своевременно оптимизированы [6]. При этом оптимизационные подсистемы отвечают за адаптацию горных конструкций к актуальным условиям и состоянию ГТС путем взаимной оптимизации их параметров по определенным критериям (рис. 1).

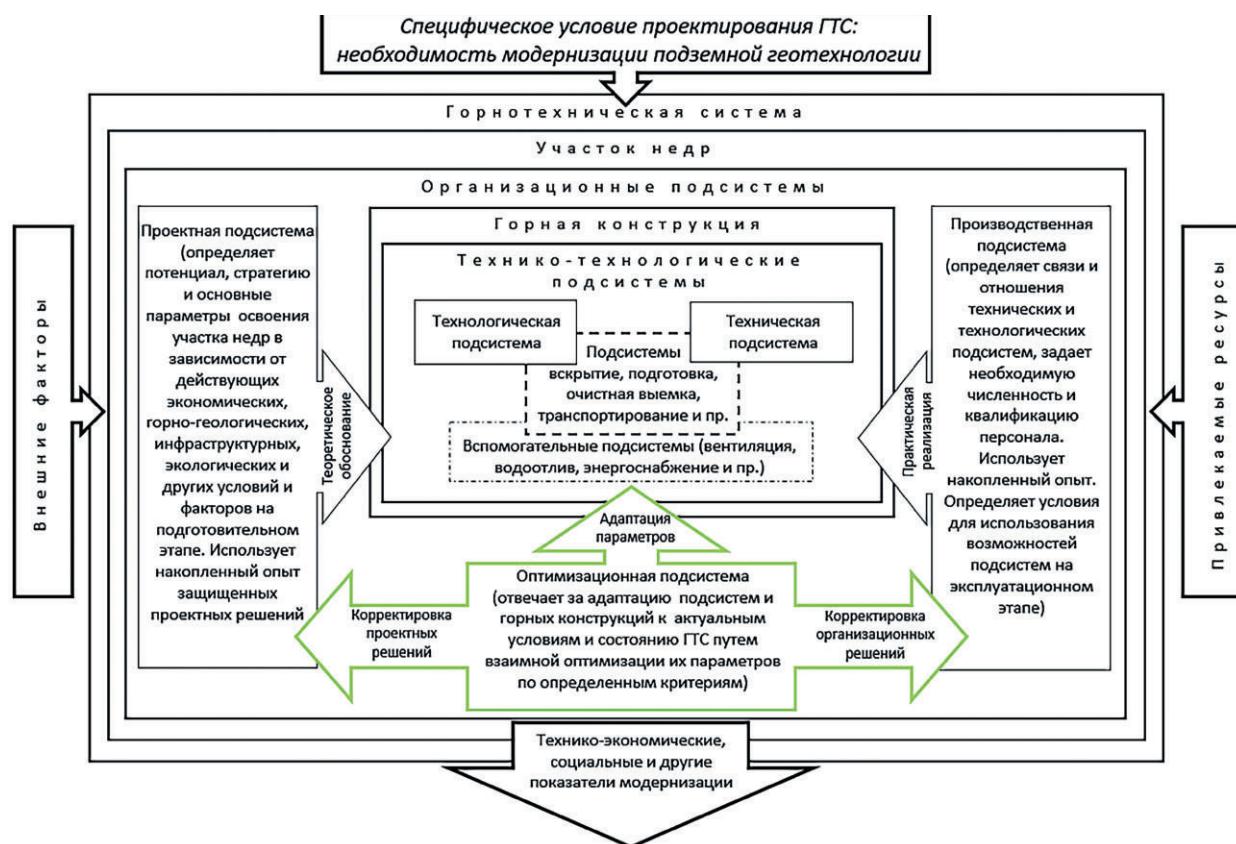


Рис. 1
Блок-схема модернизации подземной геотехнологии

Fig. 1
A block diagram of upgrading an underground mining system

Основными направлениями модернизации геотехнологии являются: нейтрализация негативных факторов путем совершенствования и оптимизации параметров технологических процессов [7]; внедрение оборудования, работающего на разработанных алгоритмах программного управления [8]; оптимизация конструкции и параметров систем разработки для повышения показателей извлечения [9]; внедрение высокопроизводительного оборудования [10] и приведение проектной производственной мощности к гармоничному значению за счет взаимной адаптации проектных решений и реальных возможностей предприятия.

С учетом современного развития науки и техники особенно актуальной является необходимость создания горнотехнических условий для эффективного использования средств цифровизации и внедрения автоматизации производственных процессов. Это, в свою очередь, требует совершенствования и адаптации конструкции и параметров систем разработки для применения роботизированного оборудования.

Материалы и методы

Методический подход к обоснованию подземной геотехнологии при модернизации действующих рудников заключается в создании горнотехнических условий для эффективного освоения месторождения с использованием средств цифровизации и роботизации. При освоении рудником модернизированной геотехнологии, а также переходе к роботизированным технологическим процессам на действующих рудниках должен произойти качественный скачок или сохраниться стабильность функционирования ГТС. Модернизированная геотехнология должна иметь способность оперативно адаптироваться к изменяющимся горно-геологическим и экономическим условиям освоения месторождения, сохраняя и повышая потенциал использования ранее применяемых технических решений, гармонично используя сложившиеся горнотехнические условия (схему и способ вскрытия, сформированные конструкции элементов систем разработки, технологические процессы очистной выемки, транспортную систему рудника и др.).

При внедрении технических решений нового технологического уклада в горное производство используются три подхода – адаптивный, дезадаптивный и комплементарный (рис. 2).

Адаптивный подход заключается в приспособлении

применяемой на руднике геотехнологии к использованию средств цифровизации, роботизации и автоматизации. В результате использования адаптивного подхода происходит замедленный переход к новому укладу, где модули ГТС, направленные на цифровизацию, роботизацию и автоматизацию, а также расширение их возможностей, не будут реализованы в полной мере, поскольку качественный разрыв между техническим уровнем подземной геотехнологии и цифровизацией, роботизацией и автоматизацией не будет ликвидирован в силу невозможности использования всех преимуществ нового технологического уклада.

Дезадаптивный подход заключается в ультимативном внедрении модуля цифровизации, роботизации и автоматизации без должной оценки горнотехнических условий предприятия и самой геотехнологии. В результате при дезадаптивном подходе происходит неэффективное или бесполезное использование новых технических возможностей модуля цифровизации, роботизации и автоматизации с неизбежными отрицательными социальными последствиями при сопротивлении внедрению новых технологических возможностей со стороны персонала.

Комплементарный подход заключается в сохранении основных преимуществ действующей на руднике геотехнологии, модернизированной с использованием цифровизации и роботизации до частичного или полномасштабного освоения автоматизации [11–14]. В результате использования комплементарного подхода происходит поэтапное, гармоничное освоение и эффективное применение современных технологий в новом этапе жизненного цикла ГТС.

Результаты и их обсуждение

Накопленный лабораторией подземной геотехнологии ИГД УрО РАН опыт при разработке и внедрении технических решений по модернизации подземной геотехнологии на действующих рудниках, ведущих добычу руд в разнообразных условиях, показывает, что решения, разработка которых проводилась с использованием комплементарного подхода к оптимизации параметров горных конструкций, технических и технологических подсистем ГТС для освоения средств цифровизации, роботизации и автоматизации за счет целенаправленного преобразования горнотехнических условий с учетом широкого спектра действующих внешних и внутренних факторов, позволяют обеспечить значительное повышение эффективности и безопасности ведения горных работ.

Отдельные примеры данных технических преобразований ГТС представлены в таблице.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление причин и факторов, прямо или косвенно влияющих на эффективность освоения новых проектных решений, использующих средства цифровизации и роботизации в сложившихся условиях работы горнодобывающих предприятий.

Заключение

Для того чтобы цифровизация, роботизация, а в последующем и полная автоматизация принесли желаемый эффект, необходимы значительная подготовительная работа по обоснованию параметров ГТС, а также создание условий для применения программного обеспечения и оборудования, технологическое функционирование которого зависит от получения актуальной геологической информации об объекте разработки и оперативных данных по освоению участка недр.

Рис. 2
Схема оптимизации основных элементов ГТС к новому технологическому укладу

Fig. 2
A schematic diagram of optimizing key elements of the mining system for the new technological mode

Таблица

Технические решения при модернизации подземной геотехнологии на основе комплементарного подхода к взаимной оптимизации подсистем ГТС

Table

Technical solutions in upgrading underground mining systems based on a complementary approach to mutual optimization of mining subsystems

Месторождение	Традиционная и модернизированная технология выемки	Технические решения на основе комплементарного подхода к преобразованию горнотехнических условий	Стадия реализации
Кыштымское кварцевое месторождение	Переход от камерно-столбовой системы разработки с взрыводоставкой руды к комбинированной системе разработки с камерной выемкой и последующей отработке целиков с обрушением	Порядок отработки запасов и конструкция системы разработки позволили использовать ПДМ с дистанционным управлением для изменения способа погашения выработанного пространства и снижения затрат на транспортирование пустой породы	НИР, технологический регламент, проект ОПИ, Технический проект
Урупское медноколчеданное месторождение	Переход от подэтажного обрушения с площадным выпуском руды через дучки на систему разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды и ортовой подготовкой	Применение ортовой схемы подготовки позволило расширить фронт очистных работ и обеспечить оперативное пополнение геологической блочной модели для трассировки подготовительно-нарезных выработок за счет возможности оперативной разведки	НИР, проект ОПИ, подготовка заключения для корректировки Технического проекта
Медно-никелевое месторождение «Норильск-1»	Переход от камерно-столбовой системы и этажного обрушения с торцовым выпуском руды к комбинированной системе разработки, основанной на камерной выемке с плоским днищем и отработке междукамерных целиков с обрушением	Была сохранена традиционная схема и способ подготовки запасов, созданы условия для применения ПДМ с дистанционным управлением для качественной зачистки руды в камерах, снижено разубоживание от прирезки подстилающих пород	НИР, проект ОПИ
Месторождение хромитов Алмаз-Жемчужина	Переход от системы этажного самообрушения с выпуском руды при помощи скреперных лебедок к системе этажного самообрушения с вибровыпуском руды	Конструкция днищ блоков предусмотрела использование роботизированного манипулятора для оперативной и безопасной ликвидации зависаний руды с отказом от взрывных способов, повышена производительность оборудования на выпуске руды	НИР
Жильные золоторудные месторождения	Совершенствование технологических процессов при системе разработки с магазинированием руды	Разработан способ устранения зависаний руды в очистном пространстве и рудоспусках с использованием беспилотных летательных аппаратов, повышена производительность и безопасность горных работ в условиях слабой механизации процессов очистной выемки	Патент РФ
Скалистое медноколчеданное месторождение	Переход от подэтажного обрушения с площадным выпуском на камерную систему разработки с торцовым выпуском руды и оставлением неизвлекаемых целиков	Созданы условия для применения на выпуске руды ПДМ с дистанционным управлением, снижены объемы подготовительно-нарезных работ, а также потери и разубоживание руды	НИР, проект ОПИ, Корректировка Технического проекта

Немаловажен и учет уровня квалификации персонала, инфраструктурных и внешнеэкономических условий. Повышение уровня подготовки горных инженеров, технических работников и инженерно-технических работников предприятий должно быть первоочередной вехой становления пути полномасштабного использования автоматизации на горнорудных предприятиях Российской Федерации.

Используя принципы комплементарного подхода к оптимизации параметров ГТС, модернизированная геотехнология позволит обеспечить комплексную стабильность функционирования горного предприятия и соответствие технических решений изменяющимся горно-геологическим и экономическим условиям освоения месторождений полезных ископаемых.

Список литературы / References

1. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р. Развитие исследований в области теории проектирования горнотехнических систем и геотехнологий при комплексном освоении недр. *Горный журнал*. 2024;(4):4–8.
Zakharov V.N., Kaplunov D.R. Advancing research in the theory of mining systems design and geotechnologies for integrated subsoil development. Gornyi Zhurnal. 2024;(4):4–8. (In Russ.)
2. Яковлев В.Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2022;(1S):34–45. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45>
Yakovlev V.L. Key stages and results of research to formulate methodological basis for the strategy to develop mining systems for deep seated deposits of solid minerals. Russian Mining Industry. 2022;(1S):34–45. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45>



3. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипов Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А. Результаты экспериментальных исследований подземной добычи высокого кварца в условиях Кыштымского рудника. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(1):97–106. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20180112>
Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A. Experimental investigation of underground mining of high-grade quartz in Kyshtym mine. *Journal of Mining Science*. 2018;54(1):85–93. <https://doi.org/10.1134/S1062739118013389>
4. Stacey T.R. Rock engineering design – the importance of process, prediction of behaviour, choice of design criteria, review and consideration of risk. In Potvin Y. (ed.) *Design methods 2015: Proceedings of the International seminar on design methods in underground mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015, pp. 57–76. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_0.4_Stacey
5. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Особенности технического переоснащения подземных рудников на современном этапе развития геотехнологий. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018;(3):113–122.
Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Features technical re-equipment of underground mines at the present stage of development of geotechnologies. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(3):113–122. (In Russ.)
6. Соколовский А.В., Пикалов В.А., Терешина М.А. Вопросы проектирования эффективных горнодобывающих предприятий. *Горная промышленность*. 2023;(2):22–24. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-22-24>
Sokolovskiy A.V., Pikalov V.A., Tereshina M.A. Issues in designing efficient mining operations. *Russian Mining Industry*. 2023;(2):22–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-22-24>
7. Калмыков В.Н., Петрова О.В., Мамбетова Ю.Д. Обоснование параметров технологических резервов устойчивого функционирования горнотехнической системы при подземной разработке медноколчеданных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(8):5–16. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-8-0-5-16>
Kalmykov V.N., Petrova O.V., Mambetova Yu.D. Justification of parameters of technological resources for stable performance of geotechnical system in underground pyritic-copper ore mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(8):5–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-8-0-5-16>
8. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипов Ю.Г., Никитин И.В., Барановский К.В. Направления развития и опыт применения подземной геотехнологии с использованием самоходной техники на уральских рудниках. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(4):66–74.
Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin U.G., Nikitin I.V., Baranovsky K.V. The directions and practice of underground geotechnology application in the Urals mines using self-propelled facilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(4):66–74. (In Russ.)
9. Савич И.Н., Мустафин В.И. Перспективы применения и обоснование проектных решений при этажном и подэтажном торцевом выпуске руды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S1):419–429.
Savich I.N., Mustafin V.I. Perspectives of use and rationale design solutions of block (level) and sublevel face draw. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S1):419–429. (In Russ.)
10. Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С., Башков В.И. Практика технического перевооружения рудников АО «Евразрудда» на самоходное оборудование. СПб.: ПервоГрад; 2019. 397 с.
11. Хажиев В.А. Методический подход к оценке эффективности системы эксплуатации оборудования технологического комплекса горного предприятия. *Горное оборудование и электромеханика*. 2022;(2):14–21. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-2-14-21>
Khazhiev V.A. Methodological approach to assessing the efficiency of the system operation of the equipment of the technological complex of the mining enterprise. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022;(2):14–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-2-14-21>
12. Yannick I.Y. Management of efficiencies of mining equipment. *Industrial Engineering & Management*. 2018;7(3):1000264. <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000264>
13. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016;68:212–222. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>
14. Marshall J.A., Bonchis A., Nebot E., Scheding S. Robotics in Mining. In: Siciliano B., Khatib O. (eds) *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer Handbooks. Springer; 2016, pp. 1549–1576. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_59

Информация об авторах

Барановский Кирилл Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: kartingist@list.ru

Рожков Артём Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.08.2025
Поступила после рецензирования: 06.10.2025
Принята к публикации: 09.10.2025

Information about the authors

Kirill V. Baranovsky – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kartingist@list.ru

Artem A. Rozhkov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

Article info

Received: 25.08.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 09.10.2025