

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Г. С. Курчин, А. О. Шигин, А. Н. Анушенков, А. К. Кирсанов✉, Е. П. Волков

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,

660041, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

Аннотация. Рассмотрены возможности и ограничения использования беспилотных летательных аппаратов при подземном освоении месторождений полезных ископаемых. Проведен анализ ключевых функций подземных дронов, а также требований, предъявляемых к их конструкции и технологиям для работы в сложных подземных условиях. Основное внимание уделено задачам, которые дроны решают в подземных выработках, включая мониторинг состояния крепей, картографирование и 3D-моделирование, экологический и горный мониторинг и т. д. Обозначены технические и эксплуатационные проблемы, такие как ограничение радиосигнала, воздействие высокой влажности и экстремальных температур, которые могут снижать эффективность использования дронов. Сделаны выводы о значении подземных дронов для повышения безопасности и эффективности горных работ, а также даны рекомендации по их дальнейшему развитию в рамках цифровизации и автоматизации подземных операций. Результаты исследования могут быть использованы научным сообществом в качестве информационного источника.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, подземная добыча, дроны в шахтах, безопасность, мониторинг, картографирование, автоматизация

Для цитирования: Курчин ГС, Шигин АО, Анушенков АН и др. Использование беспилотных летательных аппаратов для управления процессами подземных горных работ. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(1):С. 82-86. <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-82-86>.

USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE UNDERGROUND METHOD OF FIELD DEVELOPMENT

G. S. Kurchin, A. O. Shigin, A. N. Anushenkov, A. K. Kirsanov✉, E. P. Volkov

Siberian Federal University, Federal State Autonomous Educational Institution

of Higher Education, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

Abstract. The article discusses the possibilities and limitations of using unmanned aerial vehicles in the underground development of mineral deposits. The article analyzes the key functions of underground drones, as well as the requirements for their design and technology to work in complex underground conditions. The main attention is paid to the tasks that drones solve in underground mine workings, including monitoring of the condition of supports, mapping and 3D-modeling, environmental and mining monitoring, etc. Technical and operational challenges such as radio signal limitations, exposure to high humidity and extreme temperatures that can reduce the effectiveness of drone use are highlighted. Conclusions are drawn on the importance of underground drones in improving the safety and efficiency of mining operations, and recommendations are made for their further development within the framework of digitalization and automation of underground operations. The results of the study can be used by the scientific community as an information source.

Keywords: drones, underground mining, drones in mines, safety, monitoring, mapping, automation

For citation: Kurchin GS, Shigin AO, Anushenkov AN, et al. Use of unmanned aerial vehicles in the underground method of field development. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(1):82-86. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-82-86>.

Введение

Современная горнодобывающая промышленность, являясь одной из ключевых отраслей мировой экономики, сталкивается с рядом серьезных вызовов, включая повышение требований к безопасности, рост затрат на разработку месторождений и необходимость оптимизации производственных процессов [1–3]. Эти задачи особенно актуальны при подземной добыче полезных ископаемых, которая сопряжена с многочисленными рисками для жизни и здоровья персонала, а также с высокими затратами на поддержание безопасности работ. В последние годы технологии беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), адаптированных для горнодобывающей промышленности в общем и для подземных условий в частности, открыли новые перспективы в сфере эффективного освоения месторождений [4–7]. Эти аппараты позволяют оперативно решать задачи, связанные с инспекцией выработок (мониторинг состояния крепей подземных горных выработок, оценка безопасности на рабочих участках и т. д.).

Использование подземных дронов, оснащенных системами высокоточной навигации, видеосъемки, лидаров и датчиков для анализа воздушной среды, значительно расширяет возможности управления процессами подземных горных работ. Однако отсутствие естественного освещения, повышенные концентрации пыли и необходимость работы в ограниченных пространствах накладывают специфические требования на характеристики БПЛА и профессионализм его операторов, что обуславливает невысокую популярность использования данного вида систем при освоении подземных месторождений [8].

Использование беспилотных летательных аппаратов может способствовать улучшению условий труда для рабочих, а также позволит существенно сэкономить ресурсы и время на сбор данных для планирования горнопроходческих работ. Внедрение дронов является неотъемлемой частью цифровизации и автоматизации на подземных рудниках, что на сегодняшний день является важным фактором для устойчивого развития всей горнодобывающей отрасли.

Цель исследования: провести анализ использования БПЛА при подземном способе освоения месторождений полезных ископаемых, а также оценить их потенциал для повышения безопасности и эффективности производственных процессов.

Методология

Методологическая основа исследования включает анализ актуальных научных и технических данных о применении беспилотных летательных аппаратов при подземной добыче полезных ископаемых. Осуществлен анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, технологических отчетов, обзоров рынка БПЛА, а также материалов ведущих компаний, разрабатывающих специализированные дроны для подземных условий. Источники информации были выбраны с учетом практического опыта внедрения технологий в горнодобывающую промышленность.

Результаты и обсуждение

Анализ рынка подземных БПЛА показывает, что их разработка и производство сосредоточены в экономически развитых регионах, где горнодобывающая промышленность занимает ключевое место. Подземные дроны требуют сложных

технологий навигации, высокой надежности и адаптивности к экстремальным условиям, для чего привлекаются ведущие мировые технологические компании. Практически в каждом регионе мира представлены компании, которые разрабатывают и выпускают дроны для использования в горнодобывающей промышленности (Exyn Technologies – США, Atlas Dynamics – Латвия, Airobotics – США, Flyability SA – Швейцария, Terra Drone Europe – Япония, DJI – Китай, Emesent – Австралия, Percepto – Израиль), хотя географический уровень распространения их продукции и основное направление деятельности могут различаться.

Основное назначение дронов при освоении месторождений полезных ископаемых подземным способом – проведение инспекции выработок, мониторинг состояния горного массива, анализирование структуры породы, а также создание точных 3D-карт сложных подземных пространств. Благодаря возможности работы в труднодоступных или запрещенных для нахождения людей зонах и в условиях ограниченной видимости дроны минимизируют риски для людей и повышают точность получаемых данных, что критически важно при проектировании и планировании дальнейших работ.

В таблице представлены основные (по данным проведенного литературного анализа [9–14]) аспекты использования дронов в подземном пространстве.

Как показано в таблице, подземные дроны могут играть значимую роль в различных аспектах подземных горных работ, однако их использование в таких сложных условиях сопряжено с рядом технических и эксплуатационных проблем.

Специфичные условия использования дронов под землей (наличие множества препятствий, ограниченная видимость и др.) обуславливают предъявление особых требований к их конструкциям. В частности, такие дроны должны обладать способностью к маневрированию и устойчивостью к столкновениям с различными препятствиями. Оптимальным решением является оснащение дронов системой обнаружения и уклонения от препятствий в реальном времени. С учетом динамичного расширения выработок на подземных рудниках зона покрытия радиосигнала должна увеличиваться, что усложняет задачу обеспечения связи с дроном в ходе обычной эксплуатационной деятельности, а также в экстренных ситуациях.

Основной проблемой, связанной с использованием дронов на подземных рудниках, является распространение радиосигнала в условиях горных работ. Для эффективного управления дроном необходима надежная радиосвязь между аппаратом и оператором с пультом управления. Однако в подземных условиях существует множество факторов, таких как поглощение сигнала горной породой и различными конструкциями (крепь, оборудование, коммуникации и т. д.), которые могут привести к потере связи, особенно когда дрон отдаляется от точки базирования. Одним из решений этой проблемы является внедрение системы усиленной передачи сигнала, которая позволяет дрону продолжать полет на значительные расстояния и в сложных геометрических условиях подземных выработок без потери связи. Эта система также обеспечивает постоянную передачу видеoinформации с камеры дрона, что значительно повышает эффективность и безопасность выполнения операций.

Время автономной работы дронов ограничено емкостью аккумуляторных батарей. Для выполнения длительных полетов (например, мониторинга подземных выработок) требуется использование дронов с возможностью быстрой замены ба-

**Основные аспекты применения дронов в подземных горных выработках /
Main aspects of drone application in underground mining operations**

Область использования / Area of use	Описание / Description	Используемое оборудование / Equipment used	Основные преимущества / Key benefits
Инспекция состояния крепей подземных выработок	Осмотр горных крепей для выявления повреждений, трещин и других дефектов	Камеры высокого разрешения, инфракрасные камеры	Уменьшение необходимости физического присутствия людей в опасных зонах
Картографирование и 3D-моделирование	Создание точных 3D-карт и моделей подземных пространств для дальнейшего проектирования работ	Лидары, системы SLAM, программное обеспечение для 3D-картографирования	Повышение точности данных для планирования и анализа
Мониторинг горного массива	Отслеживание изменений в массиве породы для предотвращения обрушений	Датчики напряжения, вибрации, геодезические и геофизические системы	Ранняя диагностика опасных ситуаций и предотвращение аварий
Контроль параметров окружающей среды	Измерение температуры, влажности, состава воздуха (включая содержание опасных газов)	Газоанализаторы, тепловизоры, датчики влажности	Повышение уровня безопасности, предотвращение взрывов и аварий
Поддержка (проведение) спасательных операций	Оперативный поиск и определение местоположения людей в случае аварий и обрушений	Камеры, тепловизоры, системы навигации без GPS	Сокращение времени на спасение, повышение шансов на успешную эвакуацию
Экологический мониторинг	Оценка воздействия работ на окружающую среду и условия труда	Датчики загрязнений, газоанализаторы	Уменьшение вредного воздействия на окружающую среду и безопасность работников
Применение в заброшенных шахтах	Исследование и оценка состояния старых выработок, анализ структуры для потенциального повторного освоения или безопасной консервации	Лидары, камеры высокого разрешения, инфракрасные камеры, системы анализа породы	Снижение риска для исследователей, возможность точной оценки состояния конструкций и выявления скрытых опасностей

тарей. К негативным факторам, влияющим на продолжительность работы дрона, относятся высокая влажность и низкие температуры, которые могут сократить срок службы батарей. В целях увеличения продолжительности полетов на длительных маршрутах некоторые модели дронов оснащаются гибридными системами питания, объединяющими аккумуляторные батареи и двигатели внутреннего сгорания [15].

Кроме того, повышенная влажность и возможное попадание влаги в конструкцию дронов могут привести к повреждению электронных компонентов, а также вызвать сбой в системе связи между дроном и оператором. Для обеспечения бесперебойной работы и повышения надежности требуется защита аппаратуры от воздействия влаги.

Еще одним немаловажным аспектом является видимость, поскольку при низкой освещенности или запыленности исследуемого участка работа дрона может стать затруднительной. Это требует применения специальных сенсоров, таких как тепловизоры, или инфракрасные камеры, для обеспечения качественного мониторинга и предотвращения аварийных ситуаций.

Учитывая вышеизложенное, можно подытожить, что анализ текущих технологий и областей применения подземных беспилотных летательных аппаратов показывает значительный потенциал для их интеграции в подземные горные работы. Современные дроны, оснащенные высокоточными навигационными системами, лидарными датчиками, инфракрасными камерами и системами контроля воздушной среды, могут эффективно решать задачи, связанные с мониторингом и картографированием подземных пространств. Их использование позволяет минимизировать присутствие людей в потенциально опасных зонах, что существенно снижает риск

несчастных случаев и повышает точность получаемых данных для планирования дальнейших работ.

Тем не менее эксплуатация дронов в подземных условиях сопряжена с рядом таких проблем, как необходимость обеспечения устойчивой связи на удаленных участках, ограниченное время автономной работы, а также повышенные требования к защитным конструкциям аппаратов. Для полноценного использования дронов требуется комплексное решение этих проблем, включая внедрение систем усиленной передачи сигнала, более емких и надежных источников энергии, а также применения специализированных материалов и покрытий для защиты от влаги и пыли.

Закключение

Внедрение беспилотных летательных аппаратов в подземную горнодобывающую промышленность открывает новые возможности для повышения безопасности и эффективности производственных процессов. Очевидно, что подземные дроны способны значительно снизить риски, связанные с нахождением персонала в опасных участках, и обеспечить оперативное и точное получение данных при мониторинге технического состояния выработок (контроль параметров горного массива, состояние крепления, параметров окружающей среды). Однако эффективное использование дронов в подземных условиях сопряжено с рядом технологических вызовов – для успешной работы аппараты должны обладать высокой маневренностью, устойчивостью к столкновениям, а также надежной радиосвязью на значительном удалении от оператора.

Перспективы использования дронов в подземной добыче полезных ископаемых будут напрямую зависеть от даль-

нейшего развития технологий, направленных на улучшение устойчивости, надежности и автономности аппаратов. Таким образом, подземные БПЛА становятся неотъемлемой частью цифровизации горнодобывающей промышленности и вносят вклад в устойчивое развитие отрасли, предоставляя безопасные и эффективные инструменты для выполнения задач в самых сложных и труднодоступных местах.

Выводы

1. Использование подземных беспилотных летательных аппаратов представляет собой перспективное технологиче-

ское решение для повышения безопасности и эффективности работ.

2. Для расширения использования БПЛА в подземной добыче необходимо развивать научно-технический прогресс в области связи, автономной навигации и энергообеспечения, что позволит преодолеть текущие ограничения и повысить эффективность и безопасность горных работ.

3. Внедрение БПЛА в подземную добычу способствует ускорению цифровизации и автоматизации производственных процессов, что является важным этапом устойчивого развития горнодобывающей отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Татаркин АИ, Корнилов СВ, Яковлев ВЛ и др. Прогноз технологического развития в горнодобывающих отраслях на основе модернизации техники и технологии горного производства. *Экономика региона*. 2012;4(32):80-92.
- Tatarkin AI, Kornilkov SV, Yakovlev VL, et al. Technological development forecast in the mining industry based on modernization of mining equipment and technology. *Economy of Region*. 2012;4(32):80-92. (In Russ.). doi: 10.17059/2012-4-7.
2. Зайцев ВМ, Жигальская ЛО. Постиндустриальные сдвиги в добывающей промышленности мира. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2022;(1):71-86.
- Zaytsev VM, Zhigalskaya LO. Post-industrial shifts in the world mining industry. *J. Belarus. State Univ. Geogr. Geol.* 2022;(1):71-86. (In Russ.). doi: 10.33581/2521-6740-2022-1-71-86.
3. Назарматов АА. Роль горнорудной отрасли в развитии промышленности страны. *Вестник Сургутского государственного университета*. 2021;1(31):50-6.
- Nazarmatov AA. Role of the mining sector in industrial development. *Bull. Surgut State Univ.* 2021;1(31):50-6. (In Russ.). doi: 10.34822/2312-3419-2021-1-50-56.
4. Minh DT, Dung NB. Applications of UAVs in mine industry: A scoping review. *Journal of Sustainable Mining*. 2023;22(2):5. doi: 10.46873/2300-3960.1384.
5. Rathore I, Kumar NP. Unlocking the potentiality of UAVs in mining industry and its implications. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015;4(3):852-5.
6. Артем С. Применение беспилотных летательных аппаратов на горнодобывающих предприятиях. *Горная промышленность*. 2018;6(142):60.
- Artem S. Application of unmanned aerial vehicles in mining enterprises. *Mining Industry*. 2018;6(142):60. (In Russ.).
7. Смоленцева АМ. Использование беспилотных летательных аппаратов в горном деле. *StudNet*. 2021;4(7):3.
- Smolentseva AM. Use of unmanned aerial vehicles in mining. *StudNet*. 2021;4(7):3. (In Russ.).
8. Shahmoradi J, Talebi E, Roghanchi P, et al. Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. *Drones*. 2020;4(3):34. doi: 10.3390/drones4030034.
9. Lee S, Choi Y. Reviews of Unmanned Aerial Vehicle (Drone) Technology Trends and Its Applications in the Mining Industry. *Geosystem Engineering*. 2016;19(4):197-204. doi: 10.1080/12269328.2016.1162115.
10. Dunnington L, Nakagawa M. Fast and safe gas detection from underground coal fire by drone fly over. *Environmental Pollution*. 2017;229:139-45. doi: 10.1016/j.envpol.2017.05.063.
11. Villaescusa E. Rock Mass Characterization. *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. Boca Raton, United States, 2014:78.
12. Mirzaeinia A, Shahmoradi J, Roghanchi P, et al. Autonomous routing and power management of drones in gps-denied environments through Dijkstra algorithm. *Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, Indianapolis, IN, USA, 19–22 August 2019*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (AIAA), 2019.
13. Freire G, Cota R. Capture of images in inaccessible areas in an underground mine using an unmanned aerial vehicle. *Proceedings of the 1st International Conference on Underground Mining Technology Sudbury*, ON, Canada, 11–13 October 2017.
14. Samaei M, Stothard P, Shirani Faradonbeh R, et al. Mine Closure Surveillance and Feasibility of UAV–AI–MR Technology: A Review Study. *Minerals*. 2024;14(1):110. doi: 10.3390/min14010110.
15. Gong A, Verstraete D. Design and Bench Test of a Fuel-Cell/Battery Hybrid UAV Propulsion System using Metal Hydride Hydrogen Storage. *Proceedings of the 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Atlanta, GA, USA, 10–12 July 2017*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Георгий Сергеевич Курчин –
д-р техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет», 660041, г.
Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: GKurchin@sfu-kras.ru

ABOUT THE AUTHORS

Georgii S. Kurchin –
Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Siberian
Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian
Federation, e-mail: GKurchin@sfu-kras.ru





Андрей Олегович Шигин –
д-р техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: AShigin@sfu-kras.ru

Andrey O. Shigin –
Ph. D., Associate Professor, Siberian Federal
University, 660041, Krasnoyarsk, Russian
Federation, e-mail: AShigin@sfu-kras.ru



Александр Николаевич Анушенков –
д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: AAnushenkov@sfu-kras.ru

Aleksandr N. Anushenkov –
Ph.D., Professor, Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation,
e-mail: AAnushenkov@sfu-kras.ru



Александр Константинович Кирсанов –
канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

Aleksandr K. Kirsanov –
Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Siberian
Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian
Federation, e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru



Евгений Павлович Волков –
канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: EVolkov@sfu-kras.ru

Evgeny P. Volkov –
Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Siberian
Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian
Federation, e-mail: EVolkov@sfu-kras.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.11.2024.

Поступила после рецензирования: 14.01.2025.

Принята к публикации: 15.01.2025.

Article info

Received: 21.11.2024.

Revised: 14.01.2025.

Accepted: 15.01.2025.