

Применение беспилотных летательных аппаратов в горнодобывающей промышленности

А.М. Кулешов ✉, А.Г. Богачук, К.А. Колесников, И.О. Паничкин, М.А. Марковский

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ Artemon110998@yandex.ru

Резюме: На протяжении последних десяти лет беспилотные летательные аппараты активно применяются в горнодобывающей отрасли для выполнения различных задач, начиная от разведки полезных ископаемых и заканчивая рекультивацией промышленных территорий. Особое внимание в исследовании уделено задачам аэромагнитной съемки, маркшейдерских работ и мониторинга хвостохранилищ. Преимущества использования беспилотных летательных аппаратов заключаются в повышении эффективности, снижении операционных затрат и рисков, а также в улучшении качества данных, получаемых в режиме реального времени. Приведены примеры успешного применения беспилотных летательных аппаратов для создания цифровых моделей рельефа, картирования геологических структур и мониторинга состояния склонов и горных выработок. Отмечена высокая точность и оперативность получения данных с использованием современных технологий фотограмметрии и программного обеспечения, что способствует оптимизации процедуры планирования и обеспечению более высокого уровня безопасности производственных процессов. Несмотря на значительный прогресс в использовании беспилотных летательных аппаратов, существует необходимость в дальнейшем изучении их применения для более комплексных задач, таких как интеграция данных цифровых моделей в производственные процессы и разработка методов их использования в подземных условиях.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, маркшейдерское дело, трехмерные модели, хвостохранилище, аэромагнитная съемка

Для цитирования: Кулешов А.М., Богачук А.Г., Колесников К.А., Паничкин И.О., Марковский М.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2024;(5S):33–37. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-33-37>

Application of unmanned aerial vehicles in the mining industry

A.M. Kuleshov ✉, K.A. Kolesnikov, A.G. Bogachuk, I.O. Panichkin, M.A. Markovsky

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
✉ Artemon110998@yandex.ru

Abstract: Unmanned aerial vehicles have been actively used in the mining industry over the past decade to perform various tasks ranging from mineral exploration to reclamation of industrial areas. The study focuses on the tasks of the aeromagnetic survey, mine surveying and monitoring of tailings dumps. Using unmanned aerial vehicles offers the advantages of increased efficiency, reduced operational costs and risks, as well as improved quality of real-time data. Examples are presented of the successful use of unmanned aerial vehicles to create digital terrain models, to map geological structures and to monitor the condition of slopes and mine workings. High accuracy and efficiency of data acquisition using modern photogrammetry technologies and software are noted, which helps to optimize the planning procedures and ensure a higher level of operational safety. Despite a significant progress in using unmanned aerial vehicles, there is a need to further explore their application in more complex tasks, such as integration of digital model data into production processes and development of methods to be used in underground conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicle, mine surveying, 3D models, tailing dump, aeromagnetic survey

For citation: Kuleshov A.M., Kolesnikov K.A., Bogachuk A.G., Panichkin I.O., Markovsky M.A. Application of unmanned aerial vehicles in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):33–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-33-37>

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для различных целей: при добыче, планировании и разведке полезных ископаемых, а также при взрывных работах. Использование БПЛА и связанных с ними исследований расширяется во всех отраслях промышленности благодаря возрастающему спросу на высококачественные данные, получаемые в режиме реального времени, и значительным достижениям в области разработки программного обеспечения для обработки данных [1].

Поскольку БПЛА могут быть оснащены оптическими устройствами, камерами, охватывающими различные диапазоны электромагнитного спектра, и геофизическими приборами, их можно использовать для различных целей, таких как геологическое и топографическое картирование, расчет фрагментации и объема запасов руды, а также мониторинг, связанный с безопасностью склонов, дамб и рядом других объектов.

Проведено значительное количество исследований по применению БПЛА в горнодобывающей промышленности. В работе [2] подробно описано использование БПЛА для топографической съемки. В исследовании [3] представлено краткое описание применения БПЛА на различных этапах разработки полезных ископаемых, а в работе [4] авторы проанализировали тематические исследования, связанные с использованием БПЛА для горнодобывающих предприятий, включая топографическую съемку, 3D-моделирование и мониторинг экологической среды. Кроме того, было рассмотрено несколько примеров использования БПЛА на этапе рекультивации [5]. В работе [6] авторы выполнили систематический обзор 65 статей (с июня 2010 г. по май 2020 г.) с целью обобщения результатов и выявления тенденций исследований по применению БПЛА в горной промышленности. Авторами было установлено, что БПЛА используются в горной промышленности для геологических и структурных анализов с помощью дистанционного зондирования, аэрогеофизической съемки, топографической съемки, анализа скальных склонов, исследования горных выработок, а также для наблюдения за состоянием почвы, воды и оседанием земной поверхности. Однако в представленных исследованиях не рассматривается использование БПЛА для решения альтернативных задач производственного процесса на основе данных, полученных с помощью цифровых моделей.

Результаты и их обсуждение

Применение БПЛА в горнодобывающей промышленности охватывает широкий спектр задач. БПЛА стали неотъемлемым инструментом для выполнения разнообразных операций на всех этапах горных проектов, начиная от геологоразведочных работ и заканчивая рекультивацией шахтных территорий. Их внедрение позволяет повысить эффективность и безопасность производственных процессов, обеспечить высокую точность сбора данных и мониторинга, а также сократить затраты и минимизировать риски, связанные с человеческим фактором. Рассмотрим основные области их применения в горнодобывающей промышленности.

Аэромагнитная съемка

Аэромагнитная съемка с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными методами, особенно в контексте геологической разведки. Эти

преимущества включают снижение операционных затрат и повышение эффективности на труднодоступных ландшафтах, таких как горные долины, лесистые массивы или заболоченная местность [7]. В результате использования БПЛА для получения геофизических данных, таких как измерение магнитного поля Земли, обусловленного контрастом магнитных свойств пород, становится все более популярным при разведке и определении месторождений полезных ископаемых [8].

В работе [9] авторы разработали БПЛА мультироторного типа (коптеры) для увеличения масштаба картирования напряженности магнитного поля. Эти БПЛА могут собирать данные на высоте 5 м над исследуемой местностью и используются как в стабильных, так и в сложных условиях окружающей среды. Авторы также создали специальное программное обеспечение для управления полетными заданиями БПЛА. В рамках исследования была проведена магнитная съемка в горных районах Восточной Сибири с использованием разработанных аппаратов. Сравнение воздушной и наземной съемки показало, что высокая чувствительность системы к магнитным аномалиям на низких высотах позволяет обнаруживать важные геологические структуры.

Использование БПЛА для аэромагнитной съемки позволяет эффективно выполнять разведочные работы на обширных территориях, где наземные методы оказались бы слишком трудоемкими и дорогостоящими.

Применение БПЛА в маркшейдерском деле

Одной из областей применения БПЛА в горнодобывающей промышленности является маркшейдерское дело. В основном они используются для планирования шахт, подсчета минеральных ресурсов и запасов руды [10]. В последнее время все большее значение приобретает создание 3D-моделей шахтных участков и использование БПЛА для маркшейдерских работ. Технология БПЛА позволяет получать изображения высокого разрешения, которые затем преобразуются в 3D-модели поверхности, такие как цифровая модель рельефа (ЦМР), цифровая модель поверхности (ЦМП), и могут быть использованы для создания топографических карт, расчета объема выработок и создания 3D-моделей для различных задач [11]. Одной из таких задач является мониторинг состояния рельефа и деформаций горных объектов в реальном времени. Использование БПЛА позволяет оперативно отслеживать изменения, что особенно важно для контроля состояния открытых карьеров, склонов и шахтных выработок, а также для обеспечения безопасности на производственных объектах [12].

В настоящее время применение традиционных методов в маркшейдерских работах для функционирования горнодобывающих предприятий требует значительных финансовых и временных затрат. На сегодняшний день компании применяют различные технологии, включая наземное лазерное сканирование с использованием глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), пилотируемое воздушное лазерное сканирование, фотограмметрию, а также БПЛА.

Преимущество применения БПЛА перед традиционными методами заключается не только в экономической целесообразности, но и в их способности многократно выполнять различные функции, такие как 2D- и 3D-картирование с использованием технологии LiDAR. Это обеспечивает высокую универсальность и эффективность при выполнении маркшейдерских и геодезических задач, а также способ-

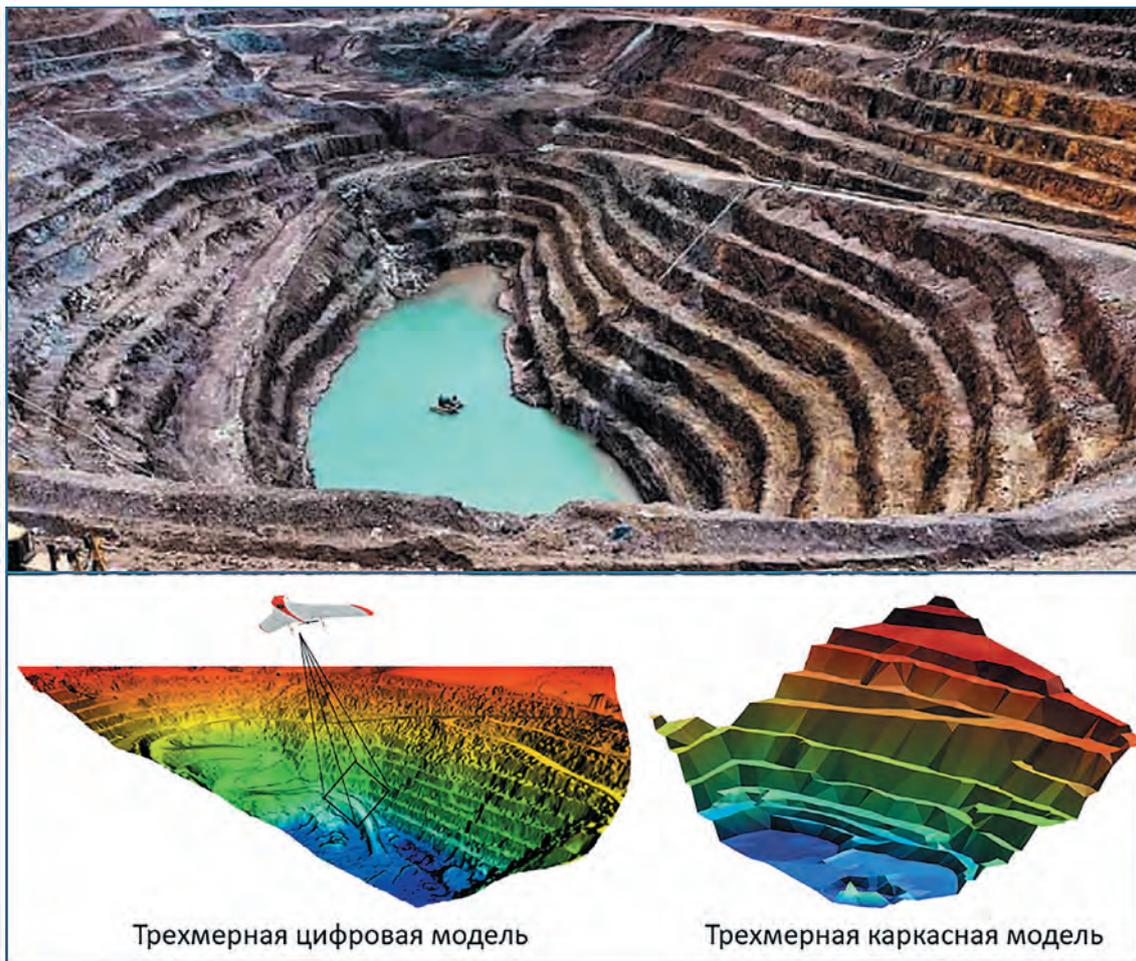


Рис. 1
Цифровые модели поверхности, полученные в результате съёмки с БПЛА

Fig. 1
Digital terrain models obtained using UAV imaging

ствуует сокращению временных затрат и повышению точности данных.

Маркшейдерские работы в подземных шахтах с применением БПЛА представляют собой сложную задачу из-за специфических условий под землей: плохая видимость, узкие проходы, магнитные помехи и отсутствие сигнала GPS. Однако современные БПЛА, оснащенные камерами высокого разрешения, светодиодными фонарями и тепловыми датчиками, могут эффективно собирать данные, такие как тепловые и спектральные изображения, расстояния, данные инерциальных измерительных блоков и звуковой навигации.

В работе [13] автор предложил систему мониторинга с использованием дронов для повышения безопасности и улучшения качества мониторинга в подземных условиях. В его исследовании показана возможность создания 3D-облаков точек на основе данных с дронов, которые оказались сопоставимыми с данными, полученными с помощью LiDAR. Несмотря на наличие помех, метод позволил выявить важные геотехнические параметры, например, трещиноватость горных пород.

В исследовании [14] авторы изучали количественную оценку параметров геологических структур, в частности трещин в скальном массиве, с использованием тепловых и многоспектральных изображений, полученных с помощью БПЛА. В рамках исследования были собраны данные разных типов, включая тепловые и многоспектральные изображения, а также КЗС-данные и данные LiDAR. На их

основе они создали геопривязанные трёхмерные облака точек и сетки для картографирования геологических разрезов.

В горнодобывающей промышленности для оценки состояния горных пород часто применяют трёхмерное моделирование с учётом рельефа местности и структурные данные о качественных показателях трещиноватости [15]. Одним из ключевых преимуществ цифровых моделей, созданных с помощью БПЛА, является их простая интеграция в различные программные комплексы для создания различных трёхмерных моделей (рис. 1). Это позволяет значительно ускорить анализ и повысить точность результатов численных расчётов, что, в свою очередь, способствует более эффективному планированию и контролю горных работ.

Регулярный мониторинг хвостохранилищ

Помимо упомянутых выше применений БПЛА в горных работах, таких как картографирование, аэрогеофизическая съёмка, маркшейдерские работы и т. д., БПЛА также являются полезным инструментом для исследования горных отвалов. В исследовании [16] проводился мониторинг хвостохранилища с использованием БПЛА на протяжении 3 лет, чтобы оценить возможность оседания хвостов. Для этого применялась фотограмметрия SfM (процесс, который оценивает трёхмерные координаты точек поверхности, используя изображения одного физического объекта, сделанные с разных углов), что позволило создавать еже-

годные топографические модели поверхности хвостохранилища и отслеживать её изменения с течением времени. Результаты показали, что мониторинг с использованием БПЛА достаточно точен для поддержания эффективного управления хвостохранилищами и отслеживания смещений поверхности с точностью до дециметров [16].

Одним из ведущих производителей беспилотников в России, используемых для съемки местности, является компания «Геоскан». БПЛА поставляется с интегрированной системой PPP/PPK. Он имеет впечатляющее время полета 60–80 мин в зависимости от полезной нагрузки и может летать при очень сильном ветре, относительно других дронов своего класса, со скоростью 64–130 км/ч. Эти и другие параметры должны учитываться при фотограмметрической обработке для обеспечения соответствия конечного продукта требованиям нормативно-технических документов.

Для обработки изображений используют коммерческое программное обеспечение «AGISOFT PhotoScan» (Agisoft LLC, Санкт-Петербург, Россия) [17]. Эта программа в значительной степени ориентирована на автоматизацию процесса обработки данных, что существенно способствует оперативному получению топографической информации и снижает затраты на рабочий процесс. Результаты обработки на каждом этапе могут быть использованы в последующих этапах, а также экспортированы в обменный формат данных для дальнейшего использования в сторонних

приложениях¹. Такая комбинация технологий позволяет значительно улучшить производительность и снизить затраты на рабочий процесс.

Выводы

Применение БПЛА в горнодобывающей промышленности демонстрирует значительные преимущества на всех этапах производственного процесса, начиная от разведки месторождений до рекультивации нарушенных территорий. Внедрение БПЛА позволяет повысить точность и оперативность получения данных, минимизировать риски, связанные с человеческим фактором, а также сократить затраты на выполнение геологоразведочных и маркшейдерских работ. Современные технологии, включая аэромагнитную съемку, фотограмметрию и 3D-моделирование, открывают новые возможности для мониторинга и управления состоянием горных объектов, что способствует повышению безопасности и устойчивости горнодобывающих проектов. Однако, несмотря на значительный прогресс в использовании БПЛА, существует необходимость в дальнейшем изучении их применения для более комплексных задач, таких как интеграция данных цифровых моделей в производственные процессы и разработка методов их использования в подземных условиях.

¹ Руководство пользователя Agisoft PhotoScan. Professional Edition, версия 1.4. Режим доступа: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf (дата обращения: 06.09.2024).

Список литературы / References

1. Гришин И.А., Козлова А.Е., Дерина Н.В., Великанов В.С., Хамидулина Д.Д., Логунова Т.В. Реализация возможностей использования беспилотных летательных аппаратов в горном деле. *Уголь*. 2022;(5):36–41. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-36-41>
Grishin I.A., Kozlova A.E., Dyorina N.V., Velikanov V.S., Khamidulina D.D., Logunova T.V. Implementing the potential of unmanned aerial vehicle in mining. *Ugol'*. 2022;(5):36–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-36-41>
2. Тихонов А.А., Акматов Д.Ж. Актуальность применения мультикоптеров на производстве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):55–62. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2019/1/55_62_1_2019.pdf (дата обращения: 06.09.2024).
Tikhonov A.A., Akmatov D.Zh. Time to use multicopters in industry. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):55–62. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2019/1/55_62_1_2019.pdf (accessed: 06.09.2024).
3. Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Иванов И.Г., Жуков А.О. Применение беспилотных летательных аппаратов при геологоразведочных и поисково-оценочных работах. *Исследование Земли из космоса*. 2021;(1):78–88. <https://doi.org/10.31857/S0205961421010061>
Ivanova Yu.N., Ivanov K.S., Bondareva M.K., Ivanov I.G., Zhukov A.O. The use of unmanned aerial vehicles for the search and prediction of ore mineralization. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021;(1):78–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0205961421010061>
4. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Hu Z. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019;6:320–333. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5>
5. Dering G.M., Micklethwaite S., Thiele S.T., Vollgger S.A., Cruden A.R. Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019;373:148–166. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.018>
6. Park S., Choi Y. Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: A review. *Minerals*. 2020;10(8):663. <https://doi.org/10.3390/min10080663>
7. Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K., Paulusson A., Johansson H., Bastani M. et al. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden. *The Leading Edge*. 2017;36(7):552–557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>
8. Døssing A., da Silva E.L.S., Martelet G., Rasmussen T.M., Gloaguen E., Petersen J.T., Linde J. A high-speed, light-weight scalar magnetometer bird for km Scale UAV magnetic surveying: on sensor choice, bird design, and quality of output data. *Remote Sensing*. 2021;13(4):649. <https://doi.org/10.3390/rs13040649>
9. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Yu., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S. et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-Geophysics. *Applied Sciences*. 2021;11(5):2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>

10. Курбатова В.В., Волин А.М., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю. Обоснование рационального применения беспилотных летательных аппаратов при маркшейдерском обслуживании открытых горных работ на руднике «Дукат». *Горный журнал*. 2023;(4):16–19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.04.03>
Kurbatova V.V., Volin A.M., Lomakina N.E., Garifulina I.Yu. Justification of UAV smart use range in surveying of Dukat open pit mining area. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(4):16–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.04.03>
11. Martelet G.; Gloaguen E.; Døssing A.; Lima Simoes da Silva E.; Linde J.; Rasmussen T.M. Airborne/UAV multisensor surveys enhance the geological mapping and 3D model of a pseudo-skarn deposit in Ploumanac’h, French Brittany. *Minerals*. 2021;11(11):1259. <https://doi.org/10.3390/min11111259>
12. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;(1):144–147. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>
Akmатов D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar interferometry as supplement to classical methods to observe earth’s surface displacement. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):144–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>
13. Raj P. Use of drones in an underground mine for geotechnical monitoring. Master’s. Thesis, The University of Arizona, Phoenix, AZ, USA, 2019. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/222806204.pdf> (accessed: 06.09.2024).
14. Turner R.M., MacLaughlin M.M., Iverson S.R. Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery. *Engineering Geology*. 2020;266:105470. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105470>
15. Татаринев В.Н., Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Шевчук Р.В. Иерархический подход к оценке устойчивости геологической среды в геомеханических исследованиях. *Горный журнал*. 2024;(1):15–21. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.03>
Tatarinov V.N., Akmатов D.Zh., Manevich A.I., Shevchuk R.V. Hierarchical approach to assessing sustainability of geological environment in geomechanical studies. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(1):15–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.03>
16. Rauhala A., Tuomela A., Davids C., Rossi P.M. UAV remote sensing surveillance of a mine tailings impoundment in sub-arctic conditions. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1318. <https://doi.org/10.3390/rs9121318>
17. Тихонов А.А., Акматов Д.Ж. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):192–198. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-192-198>
Tikhonov A.A., Akmатов D.Zh. Review of aerophotography data processing programs. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):192–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-192-198>

Информация об авторах

Кулешов Артем Михайлович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Artemon110998@yandex.ru

Колесников Константин Александрович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: konstantin.kolesnikow@yandex.ru

Богачук Анатолий Григорьевич – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: tolyan_bog@bk.ru

Паничкин Илья Олегович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru

Марковский Максим Андреевич – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: maks_markovskiy@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.07.2024

Поступила после рецензирования: 02.10.2024

Принята к публикации: 09.10.2024

Information about the authors

Artem M. Kuleshov – Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying in the Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Artemon110998@yandex.ru

Konstantin A. Kolesnikov – Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying in the Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: konstantin.kolesnikow@yandex.ru

Anatoly G. Bogachuk – Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying in the Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: tolyan_bog@bk.ru

Ilya O. Panichkin – Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying in the Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru

Maxim A. Markovskiy – Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying in the Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: maks_markovskiy@mail.ru

Article info

Received: 21.07.2024

Revised: 02.10.2024

Accepted: 09.10.2024