

АНАЛИЗ ОПЫТА ВНЕДРЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ ТЕХНИКИ НА КАРЬЕРАХ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Лигоцкий Д.Н., Долгушин Н.А.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: беспилотный карьерный транспорт, параметры систем разработки, роботизированный автосамосвал, безлюдная технология, карьер, транспортирование горной массы.

Аннотация. Решение об эксплуатации на месторождении беспилотной техники способно положительно влиять на процессы открытых горных работ, уменьшая капитальные и эксплуатационные расходы, обеспечивая безопасность ведения добычи и сокращая экологический ущерб, наносимый предприятием. Одним из ключевых преимуществ использования роботизированной техники является возможность корректировки параметров систем разработки месторождений. Авторами выявлены основные факторы, на которые может оказать влияние применение беспилотного транспорта на карьере. Проанализирован мировой опыт применения роботизированной техники на месторождениях, разрабатываемых открытым способом. Исследовано влияние изменения уклона карьерной автодороги на длину капитальной схемы вскрытия. Установлена зависимость изменения производительности, при увеличении длины транспортирования при изменении доли рабочего времени, а также установлена связь с необходимым рабочим парком оборудования. Проанализировано влияние изменения угла откоса уступа на коэффициент вскрыши.

ANALYSIS OF THE EXPERIENCE OF INTRODUCING UNMANNED EQUIPMENT AT OPEN-PIT MINES AND ASSESSMENT OF THE IMPACT ON THE PARAMETERS OF THE OPEN PIT DEVELOPMENT SYSTEMS

Ligotsky D.N., Dolgushin N.A.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: unmanned open pit transport, mining system parameters, robotic dump truck, unmanned technology, open pit, rock mass transportation.

Abstract. The decision to operate unmanned equipment at the field can positively affect the processes of open-pit mining, reducing capital and operating costs, ensuring the safety of mining and reducing environmental damage caused by the enterprise. One of the key advantages of using robotic technology is the ability to adjust the parameters of field development systems. The authors have identified the main factors that can be influenced by the use of unmanned vehicles in a quarry. The international experience of using robotic technology in open-pit deposits is analyzed. The influence of changes in the slope of the quarry highway on the length of the capital opening scheme is investigated. The dependence of the change in productivity, with an increase in the length of transportation with a change in the share of working time, has been established, and a connection with the necessary working fleet of equipment has been established. The influence of the change in the slope angle of the ledge on the stripping coefficient is analyzed.

Введение

На горнодобывающих предприятиях появляется все больше средств автоматизации и диспетчеризации производств [1, 2], что позволяет повысить эффективность работы предприятия, снизить простои и эксплуатационные расходы [3-5]. Однако, принимая во внимание растущие цены на энергоресурсы и необходимость снижения себестоимости полезного ископаемого, с целью поддержания уровня конкурентоспособности, а также смещение акцента добычи в регионы с суровыми климатическими условиями предприятия сталкиваются с необходимостью поисков новых мероприятий по снижению издержек и повышению производительности оборудования [6, 7]. Одним из таких мероприятий может стать применение беспилотной техники [8-10].

В мировой практике уже есть положительный опыт применения роботизированной техники. Лидирующую позицию в этом направлении занимает Австралия, на предприятиях которой эксплуатируется свыше 800 единиц беспилотной карьерной техники [11]. Внедрение данного оборудования было обосновано необходимостью снижения затрат на фонд оплаты труда и улучшением параметров безопасности на производстве. Директора предприятий, на которых было принято решение о внедрении беспилотной техники, отмечают, что данное мероприятие повлекло за собой сокращение ряда эксплуатационных расходов. Был снижен износ шин на 15-20%, сокращены затраты на топливо на 5% и на техническое обслуживание машины на фоне увеличения срока службы машины, за счет оптимальной работы двигателя вследствие применения интеллектуальных систем управления [12].

В России первый опыт применения беспилотной техники был получен на карьере «Удачный». При разработке нижележащих горизонтов, с целью обеспечения безопасности производства горных работ, было принято решение о применении дистанционно управляемого комплекса шарнирно-сочлененных автосамосвалов [13, 14]. Дальнейший опыт применения беспилотной техники будет описан ниже.

Беспилотная техника также работает на месторождениях в Канаде, Чили, Бразилии, Перу, Швеции, Норвегии и США. Отдельно стоит упомянуть производство Китая, который за последние 3 года совершило стремительное развитие в разработке карьерного беспилотного оборудования. Китайские автономные машины работают не только на стадии транспортирования горной массы, но и при ее экскавации [15].

Производством автономных машин занимаются крупнейшие производители карьерной техники: Caterpillar, Komatsu, Hitachi, Volvo, Scania, модели которых уже прошли полевые испытания и нашли реальное применение на месторождениях по всему миру [16]. Отечественные производители также не остались в стороне. Компания БелАз в 2018 году провела на полигоне испытания беспилотной модели БелАЗ-7513R, а в 2021 году отправила машины на опытные испытания на Абаканский угольный разрез компании «СУЭК-Хакасия» [17]. В 2022 году конструкторы ПАО «КАМАЗ» разработали уникальный самосвал КАМАЗ-6559 «Юпитер 30». В машине отсутствует кабина для водителя, что говорит о возможности применения челночного хода и как следствие сокращение времени транспортирования за счет сокращения времени постановки под погрузку и разгрузку. Грузоподъемность машины составляет 30 тонн, что говорит о ее ориентированности на карьеры малой производительности, в частности карьеры нерудных строительных материалов. По заявлению генерального директора ПАО «КАМАЗ» в 1 квартале 2024 года машина начала проходить полевые испытания на карьере в Кемеровской области.

Применение на месторождениях роботизированной техники влияет на ESG рейтинг предприятия. В первую очередь это касается социального аспекта, так как применение беспилотной техники подразумевает повышение уровня безопасности труда работника предприятия [18], и его работу в комфортных условиях (из офиса). Кроме улучшения условий труда решается вопрос нехватки квалифицированных кадров при разработке месторождений, находящихся в суровых климатических условиях [19]. Во-вторых, применение беспилотной техники способно сократить выбросы от работы ДВС за счет оптимизации работы двигателя, управляемого непосредственно самой машиной, и применения биотоплива [20, 21].

Однако решение о применении на карьере беспилотной техники на данный момент требует увеличения начальных инвестиций, что предполагает извлечения максимальной прибыли из данного мероприятия на всех возможных этапах. Это особенно важно при планировании горных работ. Одно из основных преимуществ внедрения безлюдной технологии, способной сократить издержки, является корректировка параметров систем разработки месторождений (уклон трассы, угол откоса уступа). Такая возможность предоставляется при проведении постоянного мониторинга устойчивости бортов карьера [22, 23]. Авторами рассмотрено влияние указанных параметров на комплекс параметров и показателей горнодобывающего предприятия.

Материалы и методы исследований

На основе литературного анализа, были выявлены преимущества, получаемые при внедрении беспилотной техники, и их влияние на изменение параметров систем разработки. Данный способ был дополнен расчетно-аналитическим и сравнительным методами. Авторами были произведены расчеты изменения длины капитальной схемы вскрытия при изменении уклонов карьерных автодорог от 80 до 150‰, изменения производительности и расстояния транспортирования при изменении доли рабочего времени техники. Установлена зависимость производительности и необходимого рабочего парка оборудования при различной доле рабочего времени. По результатам расчетов авторами построены графики для иллюстрации исследуемых зависимостей и проведен анализ, с целью вывода закономерностей. Для демонстрации влияния угла откоса уступа на объем вскрышных работ построен разрез карьера и проведен расчет и сравнение коэффициентов вскрыши.

Результаты и обсуждение

Изменение уклона трассы

Авторами было произведено исследование влияния величины уклона на длину капитальной схемы вскрытия. Были рассчитаны длины трасс при 5 уступах высотой 12 метров, и уклоне от 80 до 150‰. Результаты исследований представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Табл. 1. Влияние уклона на длину капитальной схемы вскрытия

Уклон автодороги, ‰							
80‰	90‰	100‰	110‰	120‰	130‰	140‰	150‰
Общая длина капитальной схемы вскрытия, метров							
950	870	805	750	700	665	632,5	605
Разница с соседним значением, метров	80	65	55	50	35	32,5	27,5
Разница с изначальным значением, метров	80	145	200	250	285	317,5	345
Разница с изначальным значением, %	8,42	15,26	21,05	26,32	30,00	33,42	36,32
Разница соседних значений, %		6,84	5,79	5,26	3,68	3,42	2,89

Установлено, что зависимость уклона от протяженности капитальной схемы вскрытия является нелинейной (рис. 1) и постепенно уменьшает влияние величины уклона на длину капитальной схемы вскрытия. Также авторами произведены расчеты для длины капитальной схемы вскрытия от 1 до 4,5 километров и установлено, что при изменении уклона с 80 на 120‰ длина капитальной схемы вскрытия в среднем будет сокращаться на 24% (рис. 2).

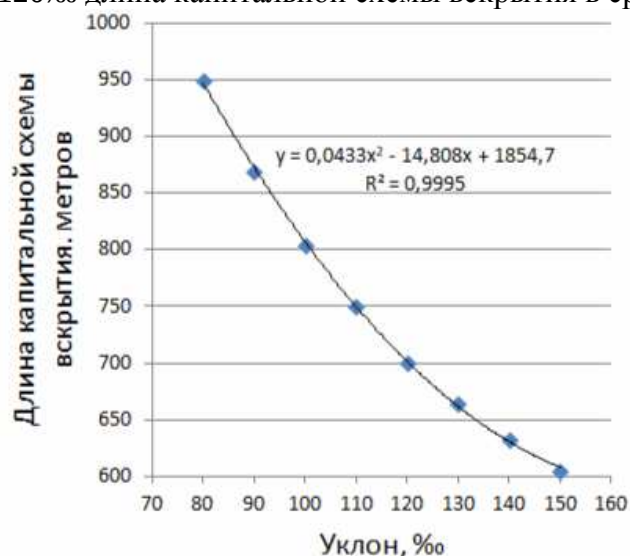


Рис. 1. Зависимость длины капитальной схемы вскрытия от уклона

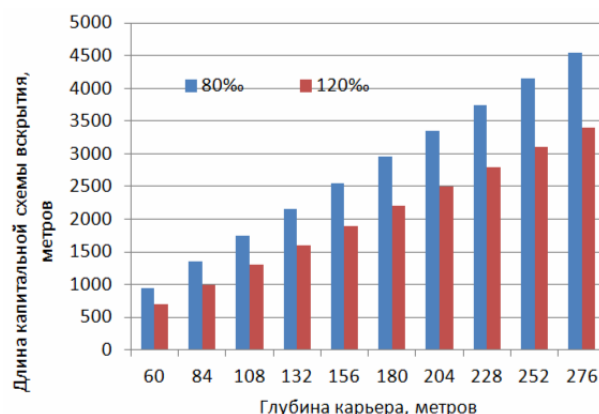


Рис. 2. Сравнение длинны капитальной схемы вскрытия при уклоне 80 и 120‰

Однако, не смотря на сокращение длины капитальной схемы вскрытия, во внимание стоит принимать увеличивающийся расход топлива, вследствие более тяжелых режимов работы двигателя, повышающий эксплуатационные затраты.

Влияние доли рабочего времени на парк автосамосвалов

Согласно исследованиям [24, 25] доля рабочего времени при управлении машиной человеком составляет в среднем 70%, а при беспилотном 80%. Авторами проанализировано влияние длины транспортирования на производительность оборудования при различной доле рабочего времени (рис. 3). Анализируя данные, установлено, что при одинаковой длине транспортирования увеличение доли рабочего времени на 10% приводит к повышению производительности оборудования на 14%.

На основе полученных данных произведен расчет необходимого парка самосвалов при различной доле рабочего времени, при условии, что требуемая сменная производительность 30000 м³/смену (рис. 4).

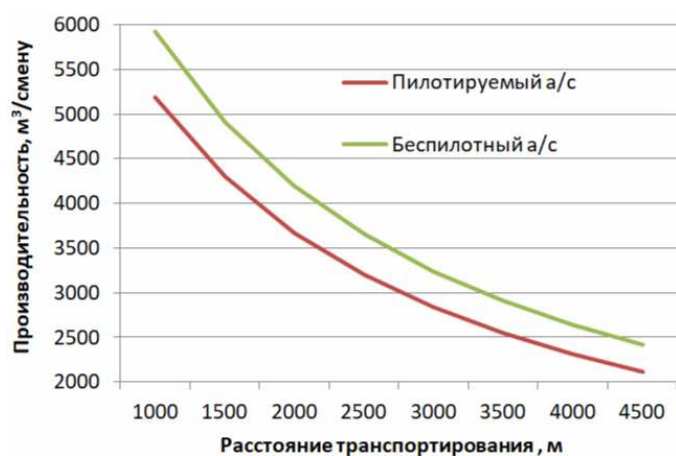


Рис. 3. Сравнение производительности автосамосвалов при увеличении длины транспортирования и изменении доли рабочего времени

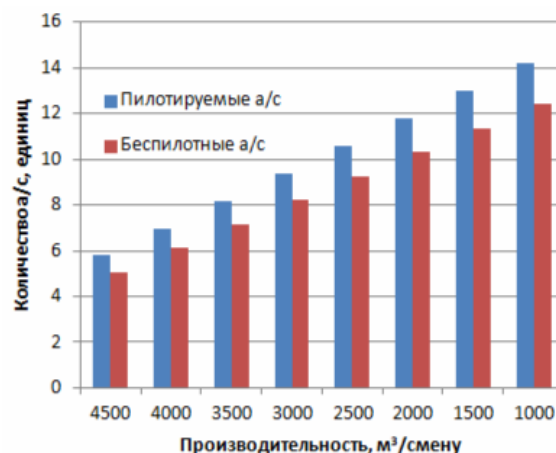


Рис. 4. Сравнение количества автосамосвалов при различной доле рабочего времени

Анализируя график, становится понятно, что доля рабочего времени влияет прямо пропорционально на рабочий парк автосамосвалов, что позволяет сократить рабочий парк на 17%.

Влияние изменение угла откоса уступа на коэффициент вскрыши

При применении безлюдной технологии коэффициент запаса устойчивости может быть снижен до 1,1 (приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов" от 13 ноября 2020 г. № 439), что позволяет изменить угол откоса уступа. Изменение данного параметра оказывает прямое влияние на коэффициент вскрыши. Для демонстрации преимуществ предлагаемого решения авторами произведен расчет и сравнение коэффициентов вскрыши в заданном контуре с параметрами: угол откоса уступа 70 (черный контур) и 72 градуса (красный контур), высота уступа 12 метров (рис. 5).

Общая площадь, занимаемая полезным ископаемым: 2007,4 м².

Площадь вскрыши при 70 градусах: 3269,44 м², при 72 градусах: 3077,98 м².

Коэффициент вскрыши в первом случае равен 1,63 м³/м³, а во втором 1,53 м³/м³, что позволяет сделать вывод о сокращении коэффициента вскрыши на 5,9%.

Изменение угла откоса приведет к снижению себестоимости добычи полезного ископаемого за счет перераспределения объема вскрышных работ.



Рис. 5. Влияние угла откоса уступа на объем вскрышных пород в конечном контуре карьера

Выводы

Изменение уклона карьерной автодороги постепенно снижает свою эффективность. При решении об изменении уклона съезда с 80 до 120‰ длина капитальной схемы вскрытия будет сокращена на 24% независимо от глубины карьера.

Повышение доли рабочего времени отражается на производительности горного оборудования, что в свою очередь способно повлиять на объем парка автосамосвалов. Принимая во внимание возможность повышения доли рабочего времени на 10% при эксплуатации беспилотного транспорта, рабочий парк может быть сокращен на 15%.

Проектирование безлюдной технологии при разработке месторождения позволит изменить коэффициент запаса устойчивости и угол откоса борта карьера, что приведет к сокращению объема вскрышных пород и как следствие повышению эффективности производства.

Список литературы

1. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228-233. – doi.org/10.31897/pmi.2020.2.228.
2. Великанов В.С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 29-36. – doi.org/10.31897/pmi.2020.1.29.
3. Аброськин А.С. Применение современных систем автоматизации на открытых горных работах // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг Георесурсов. – 2015. – Т. 326, №12. – С. 122-130.
4. Фомин С.И., Говоров А.С. Стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – №11. – С. 165-179. – doi.org/10.25018/0236_1493_2024_11_0_165.
5. Сорокин О.И., Шоков А.А. Внедрение автоматизированной системы управления горнотранспортным комплексом // Горный журнал. – 2017. – №5. – С. 85-88. – doi.org/10.17580/gzh.2017.05.20.
6. Логинов Е.В., Кара С.В., Масальский С.С., Петров К.Д. Обоснование параметров системы открытой разработки при использовании комплекса экскаватор–автосамосвал в условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 6. – С. 17-30. – doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_17.
7. Юрак В.В., Душин А.В., Мочалова Л.А. Против устойчивого развития: сценарии будущего // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 242-247. – doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242.
8. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е. Современное состояние и перспективы развития роботизированных грузоперевозок на карьерах // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №6. – С. 16-24. – doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-16-24.
9. Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р., Ефремова В.А. Метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем на горных машинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №9-1. – С. 49-63. – doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_49.
10. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №6. – С. 3-8. – doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-3-8.

11. Gaber T., Jazouli Y.E., Eldesouky E., Ali A. Autonomous haulage systems in the mining industry: cybersecurity, communication and safety issues and challenges // *Electronics*. 2021, vol. 10(11), p. 1357. doi.org/10.3390/electronics10111357.
12. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е., Сыркин И.С., Назаренко С.В., Юнусов И.Ф. Обзор систем безлюдных грузовых перевозок на карьерах // *Уголь*. – 2022. – №S12. – С. 30-36. – doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36.
13. Лель Ю.И., Глебов И.А. Обоснование оптимального уклона крутонаклонных автосъездов для полноприводных автосамосвалов, эксплуатируемых при доработке алмазородных месторождений // *Горная промышленность*. – 2022. – №S1. – С. 95-99. – doi.org/10.30686/1609-9192-2022-S1-95-99.
14. Акишев А.Н., Бабаскин С.Л., Зырянов И.В., Кожемякин А.А., Федеряев О.В. Анализ результатов опытно-промышленных испытаний схем вскрытия крутонаклонными съездами и эксплуатации горно-транспортного оборудования с системами дистанционного управления (на примере карьера «Удачный») // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – №S1-1. – С. 357-370.
15. Дубинкин Д.М., Максимова О.С. Современное состояние цифровизации и роботизации при разработке недр открытым способом // *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2022: Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 23-24 ноября 2022 года*. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 501.1-501.8.
16. Хазин М.Л. Роботизированные карьерные самосвалы // *Известия Уральского государственного горного университета*. – 2020. – №3. – С. 123-130. – doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-123-130.
17. Гусаков Г.Б. Перспективные направления развития техники "БЕЛАЗ" // *Горная промышленность*. – 2021. – № 3. – С. 44-47.
18. Решетняк С.П. Основные проблемы проектирования карьеров нового поколения // *Записки Горного института*. – 2012. – Т. 197. – С. 154-158.
19. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я. От системы "карьер" к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ // *Проблемы недропользования*. – 2019. – №3(22). – С. 39-48. – doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.039.
20. Xu X., Gu X., Wang Q., Zhao Y., Wang Z. Open pit limit optimization considering economic profit, ecological costs and social benefits // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021, vol. 31, no. 12, pp. 3847-3861. – doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65769-2.
21. Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Попова Т.М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 1. – С. 92-101. – doi.org/10.1134/S1062739117011884.
22. Цирель С.В., Павлович А.А., Мельников Н.Я. Применение физического моделирования для установления критериев потери устойчивости прибортового массива // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2017. – № 2. – С. 145-152.
23. Afanasyev A., Safiullin R., Kuznetsova E., Podoprighora N., Vaga V. Conceptual Approaches to Traffic Monitoring Design Under Varying Conditions of Vehicle Traffic // *2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria. 2022, pp. 1-5. doi.org/10.1109/EMCTECH55220.2022.9934067.
24. Price R., Cornelius M., Burnside L., Miller B. Mine planning and selection of autonomous trucks // *Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2019*. MPES 2019. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. 2020, pp. 203-212. doi.org/10.1007/978-3-030-33954-8_26.
25. Воронов Ю.Е., Воронов А.Ю., Дубинкин Д.М., Максимова О.С. Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом // *Уголь*. – 2023. – №9. – С. 75-83. – doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-75-83.

References

1. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Yu. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions // *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 228-233. doi.org/10.31897/PMI.2020.2.228.
2. Velikanov V.S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model // *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 29-36. doi.org/10.31897/PMI.2020.1.29.
3. Abroskin A.S. Application of modern automation systems in open-pit mining // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 12, pp. 122-130.
4. Fomin S.I., Govorov A.S. Strategy of formation of operating space in open pit mines based on cut-off grade control // *Mining information and analytical bulletin*. 2024, no. 11, pp. 165-179. – doi.org/10.25018/0236_1493_2024_11_0_165.
5. Sorokin O.I., Shokov A.A. Introduction of automated control over mining and transportation // *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 5, pp. 85-88. doi.org/10.17580/gzh.2017.05.20.
6. Loginov E.V., Kara S.V., Masalskiy S.S., Petrov K.D. Justification of parameters of open pit mining using truck-and-shovel systems in the Extreme North // *Mining information and analytical bulletin*. 2024, no. 6, pp. 17-30. doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_17.

7. Yurak V.V., Dushin A.V., Mochalova L.A. Vs sustainable development: scenarios for the future // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 242, pp. 242-247. doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242.
8. Voronov A.Yu., Voronov Yu.E. Current state and development prospects of the autonomous haulage at open-pit mines // Mining Equipment and Electromechanics. 2019, no. 6(146), pp. 16-24. doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-16-24.
9. Safiullin R.N., Safiullin R.R., Efremova V.A. Method of complex assessment of on-board information and control systems on mining machines // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 9-1, pp. 49-63. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_49.
10. Stenin D.V. Prospects for the development of the production of autonomous heavy platforms for un-manned mining // Mining Equipment and Electromechanics. 2019, no. 6, pp. 3-8. doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-3-8.
11. Gaber T., Jazouli Y.E., Eldesouky E., Ali A. Autonomous haulage systems in the mining industry: cybersecurity, communication and safety issues and challenges // Electronics. 2021, vol. 10(11), p. 1357. doi.org/10.3390/electronics10111357.
12. Voronov A.Yu., Voronov Yu.E., Syrkin I.S., Nazarenko S.V., Yunusov I.F. A review of unmanned haulage systems at open-pit mines // Ugol. 2022, no. S12, pp. 30-36. doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36.
13. Lel Yu.I., Glebov I.A. Justification of Optimal Gradient of Steeply Inclined Ramps for All-Wheel Drive Dump Trucks Used in Diamond Deposit Completion // Russian Mining Industry. 2022, no. 1S, pp. 95-99. doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-95-99.
14. Akishev A.N., Babaskin S.L., Zyryanov I.V., Kozhemyakin A.A., Federyaev O.V. Analysis of the results of experimental-industrial trials of opening schemes by steeply inclined ramps and running of mining and transport equipment with remote control systems (on the example of open pit "Udachny") // Mining information and analytical bulletin. 2015, no. S1-1, pp. 357-370.
15. Dubinkin D.M., Maksimova O.S. The current state of digitalization and robotization in the development of mineral resources in an open manner // Natural and intellectual resources of Siberia. SIBRESURS-2022: Collection of materials of the XIX International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, November 23-24, 2022. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University n.a. T.F. Gorbachev, 2022. – P. 501.1-501.8.
16. Khazin M.L. Autonomous mining dump trucks // News of the Ural State Mining University. 2020, no. 3, pp. 123-130. doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-123-130.
17. Gusakov G.B. Promising directions for the development of BELAZ technology // Russian Mining Industry. 2021, no. 3, pp. 44-47.
18. Reshetnyak S.P. Main problems of new generation open pit mines design // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 197, p. 154-158.
19. Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya. From the quarry system to a new intellectual way of open-pit mining // Problems of subsurface use. 2019, no. 3(22), pp. 39-48.
20. Xu X., Gu X., Wang Q., Zhao Y., Wang Z. Open pit limit optimization considering economic profit, ecological costs and social benefits // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2021, vol. 31, no. 12, pp. 3847-3861. – doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65769-2.
21. Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic Geotechnologies as Way of Improving Efficiency and Ecologization of Mineral Resource Management // Journal of Mining Science. 2017, no. 53(1), pp. 84-91. doi.org/10.1134/S1062739117011884.
22. Tsirel S.V., Pavlovich A.A., Melnikov N.Ya. Application of physical modeling to establish criteria for loss of stability of the instrument array // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2017, no. 2, pp. 145-152.
23. Afanasyev A., Safiullin R., Kuznetsova E., Podoprighora N., Vaga V. Conceptual Approaches to Traffic Monitoring Design Under Varying Conditions of Vehicle Traffic // 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria. 2022, pp. 1-5. doi.org/10.1109/EMCTECH55220.2022.9934067.
24. Price R., Cornelius M., Burnside L., Miller B. Mine planning and selection of autonomous trucks // Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2019. MPES 2019. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. 2020, pp. 203-212. doi.org/10.1007/978-3-030-33954-8_26.
25. Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Dispatching in truck-shovel systems with unmanned transport at open-pit mines // Ugol. 2023, no. 9, pp. 75-83. – doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-75-83.

Сведения об авторах:

Лиготский Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент	Ligotsky Dmitry Nikolaevich – candidate of technical sciences, associate professor
Долгушин Никита Андреевич – аспирант	Dolgushin Nikita Andreevich – postgraduate student
ndae9903@gmail.com	

Information about authors:

Получена 13.01.2025