

Анализ данных как основа повышения эффективности работы горнотранспортного оборудования при ведении открытых горных работ

М.В. Рыльникова✉, Д.А. Клебанов, Е.А. Князькин

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉rylnikova@mail.ru

Резюме: Представлены результаты анализа данных автоматической системы диспетчеризации с целью определения эффективности использования горнотранспортного оборудования. Составлен рейтинг машинистов экскаваторов по критерию качества загрузки автосамосвалов как на добычных, так и на вскрышных работах, который демонстрирует степень влияния личных профессиональных навыков персонала на процесс транспортирования горной массы. В результате проведенного исследования установлено, что при оценке влияния персонала на показатели эффективности работы горнотранспортного оборудования в отрыве от общего технологического процесса могут быть допущены ошибки интерпретации результатов работы предприятия. Предложены принципы организации автоматизированных систем внутри горнодобывающего предприятия, которые заключаются в сквозной интеграции автоматизированных систем по единому стандарту связи.

Ключевые слова: транспортирование горной массы, большие данные, автоматизированные системы, горнотранспортный комплекс, интеграции систем

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-17-00142, <https://rscf.ru/project/22-17-00142/>

Для цитирования: Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Князькин Е.А. Анализ данных как основа повышения эффективности работы горнотранспортного оборудования при ведении открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2023;(1):52–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-52-56>

Data analysis as a basis for improving the efficiency of mining equipment in open pit operations

M.V. Rylnikova✉, D.A. Klebanov, E.A. Knyazkin

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉rylnikova@mail.ru

Abstract: The paper analyzes data from an automatic dispatching system to assess the utilization efficiency of the mining transport equipment. Ranking of excavator operators in terms of the dump truck loading quality in both mining and overburden operations is made, which demonstrates the degree of personnel's personal professional skills impact on the process of rock mass transportation. As the result of the performed investigation, it was found that when assessing the impact of personnel on performance indicators of mining and transportation equipment in isolation from the overall technological process, errors can be made in interpretation of the company's performance results. Principles to organize automated systems within the mining operation are proposed, which include the end-to-end integration of automated systems using a unified communication standard.

Keywords: rock mass transportation, big data, automated systems, complex mine transport system, system integration

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No.22-17-00142, <https://rscf.ru/project/22-17-00142/>

For citation: Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Knyazkin E.A. Data analysis as a basis for improving the efficiency of mining equipment in open pit operations. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):52–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-52-56>

Введение

В энергетических затратах горных предприятий с открытым способом ведения горных работ добычные технологические процессы составляют около половины общих расходов. При этом карьерные экскаваторы – основное выемочное оборудование, которое выполняет более 80% общего объема работ и является основным потребителем

электроэнергии. В этой связи качество выполнения ими своей функции в наибольшей степени определяет эффективность работы всего горного предприятия [1; 2]. Именно поэтому в основу исследований был положен анализ работы погрузочно-транспортного комплекса рудного карьера.

Как правило, выделяют шесть групп факторов, оказывающих влияние на эффективность работы карьерных

экскаваторов [1]: 1 – горно-геологические и горнотехнические; 2 – климатические; 3 – качество подготовки забоя и дробления горной массы; 4 – опыт и навыки машинистов в управлении экскаватором; 5 – техническое состояние экскаватора; 6 – качество организации горных работ. Последняя группа наиболее обширна, в нее входят следующие факторы: своевременная погрузка автосамосвала на погрузку, что, в свою очередь, зависит от качества дорожного покрытия, системы диспетчеризации и др.; скорость ликвидации поломок, аварий, своевременной поставки запасных частей, топлива, электроэнергии; коэффициент использования самосвалов; схема постановки автосамосвала, способ его загрузки и др. [3; 4].

Так или иначе, влияние каждого фактора на эффективность процесса экскавации различается от одного горного предприятия к другому. Однако вес каждого фактора в общей совокупности, относительно других вышеперечисленных, остается неизменным. И для его оценки необходимо применять математические методы анализа полученных статистических данных. Однако в реальных условиях сбор таких данных осложняется тем, что горные предприятия, если и отслеживают необходимые для анализа показатели, то хранят их в недоступном виде для автоматизированного считывания, либо срок хранения слишком мал для получения достоверных результатов. Но вес некоторых факторов можно оценить через косвенные показатели, например, путем анализа данных автоматизированной системы диспетчеризации горного транспорта реально отследить выполненные рейсы, объемы перевозок, степень и скорость загрузки автотранспортных средств, аварийные простои, скорость передвижения и др., тем самым оценить эффективность работы машинистов экскаваторов, построив рейтинг. Несомненно, такой подход дает лишь частичное представление об исследуемом технологическом процессе, так как полную картину может показать лишь анализ большого объема данных, сгенерированного из различного рода источников. Поэтому на начальном этапе такого исследования необходимо произвести исследование получаемой информации от различного рода систем-источников, к которым, например, относится автоматизированная система диспетчеризации. Поэтапное изучение вопроса позволит не только комплексно изучить все данные по технологическому процессу и построить зависимости, гипотезы, но и разработать требования, которые должны предъявляться к источникам информации исследуемой автоматизированной системы.

Методы

Для проведения такого рода оценки произведен анализ ретроспективных данных системы диспетчеризации за период с 01.08.20 по 01.08.22 г., где фиксировалась следующая информация по каждому рейсу, совершенному за указанный промежуток времени: бортовые номера автосамосвалов (а/с) и экскаваторов; тип транспортируемой горной массы; время и координаты места загрузки и выгрузки а/с; масса груза, зафиксированная в момент разгрузки а/с; продолжительность погрузки; расход топлива а/с; паспортная и фактическая грузоподъемность а/с. Кроме того, отдельно собраны данные по сменам машинистов с привязкой к бортовому номеру рабочего экскаватора. В общей сложности на основе собранного большого объема данных проанализировано более 910 тыс. рейсов.

На основе анализа полученных данных составлены профили каждого машиниста экскаватора по качеству загрузки

ки горной массы (рис. 1), где показаны погруженные рейсы, которые были совершены за выбранный промежуток времени. По оси ординат на рисунке показано отношение погруженной в самосвал горной массы к его технической грузоподъемности. По оси абсцисс приведены все погрузки за рассматриваемый промежуток времени. Стоит отметить, что статистически установлен факт, что машинисты периодически меняют рабочий экскаватор, поэтому учет технического состояния экскаватора в данном случае можно пренебречь. На рис. 1 в качестве примера представлены соотношения фактических загрузок горной массы, выполненных машинистом, к технической грузоподъемности а/с. В расчете технической грузоподъемности всех а/с учитывалась плотность перевозимой горной массы для каждого рейса.

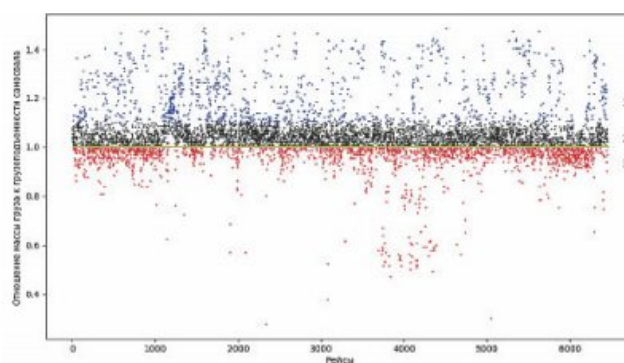


Рис. 1
Профиль машиниста экскаватора по качеству загрузки самосвалов:
1 – перегруженные рейсы;
2 – рейсы в пределах допуска;
3 – недогруженные рейсы

Fig. 1
Excavator operator's profile in terms of the dump truck loading quality:
1 – overloaded trips;
2 – trips within the tolerance;
3 – underloaded trips

Из рис. 1 видно, что машинистом за выбранный промежуток времени совершено более 6 тыс. погрузок, среди которых 15% рейсов, где вес загруженной горной породы превышает грузоподъемность самосвала, 67% – где загруженная масса в допуске и 18% – недогруженные самосвалы. При проведении оценки качества заполнения автосамосвала горной массой уровень допуска по перегрузке самосвала принят +10% к его грузоподъемности, согласно руководству по эксплуатации¹ [5]. При этом верхним уровнем недогрузки самосвала принята масса груза ниже грузоподъемности, определенной заводом-изготовителем.

Однако проведенный выше анализ не соответствует в полной мере действительности по разным причинам: налипание горной массы в кузове самосвала в холодное время года снижает полезный объем кузова; некачественное тарирование портативной системы взвешивания самосвала; наклонное положение самосвала в процессе взвешивания и т.д. Поэтому необходимо производить увеличение источников информации для определения одного параметра с большей достоверностью. Например, показания верно тарированной портативной системы взвешивания автосамосвала должны дублироваться из других источников, таких как вес горной массы в каждом загруженном ковше, а также стационарные пункты взвешивания. Несколько источников информации позволят статистическим методом исключить влияние значительного числа факторов, оказывающих влияние на качество.

¹ Руководство по эксплуатации. РУПП «БЕЛОРУССКИЙ АВТОМОБИЛЬНЫЙ ЗАВОД»

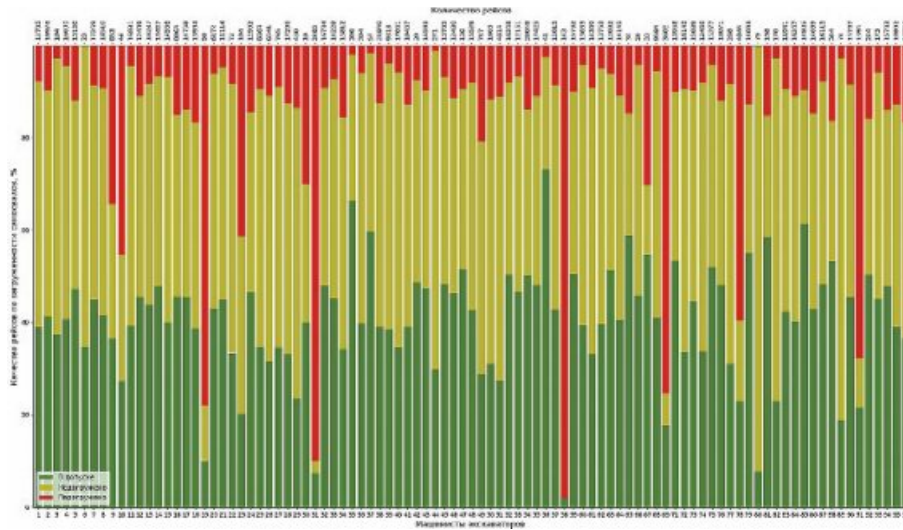


Рис. 2
Рейтинг машинистов по качеству погрузки автосамосвалов

Fig. 2
Rating of excavator operators in terms of the dump truck loading quality

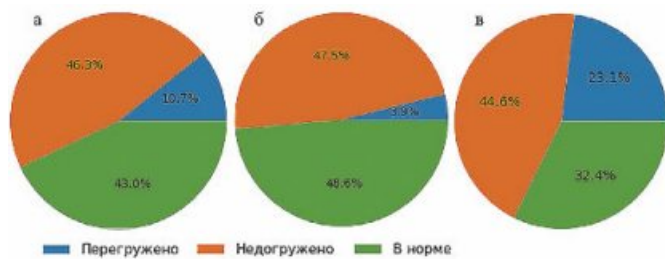


Рис. 3
Качество погрузки самосвалов по составу: а – общее по анализу 848, 4 тыс. рейсов; б – руда – 536,2 тыс. рейсов; в – вскрыша – 312,2 тыс. рейсов

Fig. 3
Dump truck loading quality in terms of load mix: а – the total of 848,4 thousand trips analyzed; б – ore: 536.2 thousand trips; в – overburden: 312.2 thousand trips

Тем не менее отношение фактической загруженной массы к технологической грузоподъемности самосвала является одним из показателей квалификации машиниста экскаватора и с учетом вышеперечисленных факторов его можно оценить. Так, на рис. 2 показана сводная столбчатая диаграмма распределения качества загрузки между машинистами экскаваторов. По оси ординат показано качество рейсов, аналогично рис. 1. По нижней оси абсцисс приведены уникальные индикаторы машинистов, а по верхней – количество погрузок, которое совершил машинист за выбранный промежуток времени.

Анализ рис. 2 показал, что процент перегруженных самосвалов от общего количества рейсов составляет 10,7293%, недогруженных – 46,2881% и 42,9824% самосвалов, загруженных в пределах их технической грузоподъемности. Кроме того, из рисунка видно, что присутствуют явные статистические выбросы по всем трем критериям качества. В первую очередь это связано с низкой наработкой некоторых машинистов, т.е. количество загрузок, которое совершили данные машинисты, недостаточно для построения достоверного рейтинга. Поэтому для снижения влияния на результат анализа подобного рода машинистов необходимо применить фильтр, которым может выступить пороговое значение, равное нижнему квартилю – 307 рейсов. Таким образом, применив данный фильтр, получаем, что явно выделившихся по перегрузам автосамосвалов осталось пятеро машинистов под номерами 9, 31, 69, 78 и 91. При этом общие доли по трем категориям качества существенно не изменились: перегруженные самосвалы –

10,7159%, недогруженные – 46,2896%, в норме – 42,9943%, что говорит о корректности примененного фильтра (рис. 3, а).

Для дальнейшего анализа причин такого отклонения у выявленной пятерки машинистов проведен детальный персональный анализ всех погрузок, из которого установлено, что все выделенные машинисты за рассматриваемый двухлетний промежуток времени работали только на вскрышных работах. Для оценки полной картины по качеству погрузки автосамосвалов на вскрышных работах отфильтруем все рудные рейсы (рис. 3, в). Из полученной диаграммы видно, что доля перегруженных самосвалов на вскрышных работах практически в 6 раз выше, чем при работе экскаваторов на рудных блоках (рис. 3, б), что, естественно, снижает процент погрузок в рамках допуска. При этом объем недогруженных автосамосвалов в обоих случаях близок по значению.

В дальнейшем был произведен анализ качества погрузки по каждому автосамосвалу, и построена диаграмма, показывающая полное количество рейсов автосамосвалов с распределением их по качеству загрузки рудой (рис. 4) и вскрышной породой (рис. 5).

В целом по автопарку установлено, что количество рейсов, совершенных с недогрузом при транспортировке рудной массы, кратно выше, чем с перегрузом, – соотношение 83% к 17% соответственно. При этом около 80% рейсов, совершенных автосамосвалами, имеют недогруз до 10%, что вписывается в погрешность измерительных приборов в совокупности с влиянием человеческого фактора в виде визуальной оценки машинистом экскаватора полноты заполнения кузова автосамосвала горной породой. Величина порога недогруженности в 10–20% резко снижается относительно предыдущего, а величина недогруза более 20% вовсе имеет среднее значение не более 6% относительно общего числа рейсов. Перегруженные выше нормы автосамосвалы на руде также присутствуют, но не превышают в общей массе 20% от технической грузоподъемности с учетом плотности перевозимой горной породы. Исключением являются автосамосвалы 120 и 122, где зашкаливает доля перегруза в диапазоне от 30 до 40% относительно остального автопарка.

Анализ качества загрузки автосамосвалов, транспортируемых вскрышные породы (рис. 5), показал иное соотношение недогруженных и перегруженных автосамосвалов – 60% к 40% соответственно. При этом на вскрышных рейсах значительно увеличиваются доли перегрузов на всех обозначенных пределах выше 20% по сравнению с рейсами

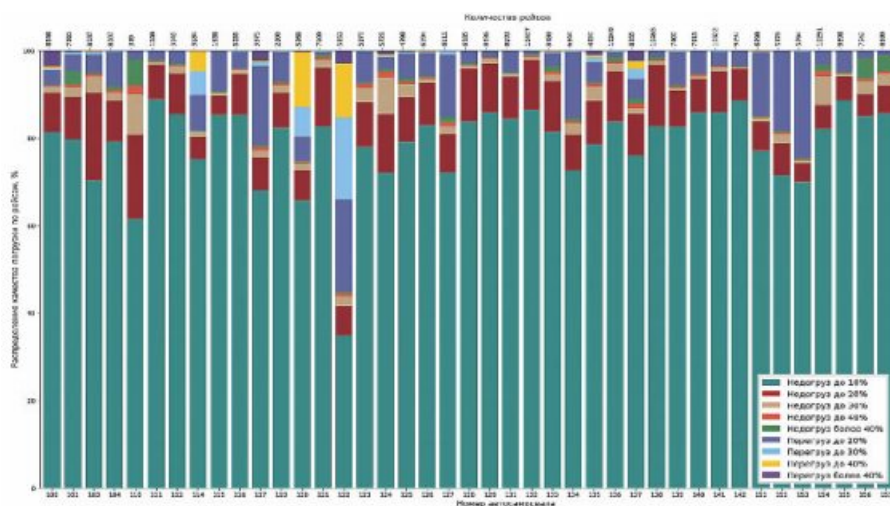


Рис. 4
Распределение качества погрузки автосамосвалов по руде

Fig. 4
Distribution of the dump truck loading quality for ore

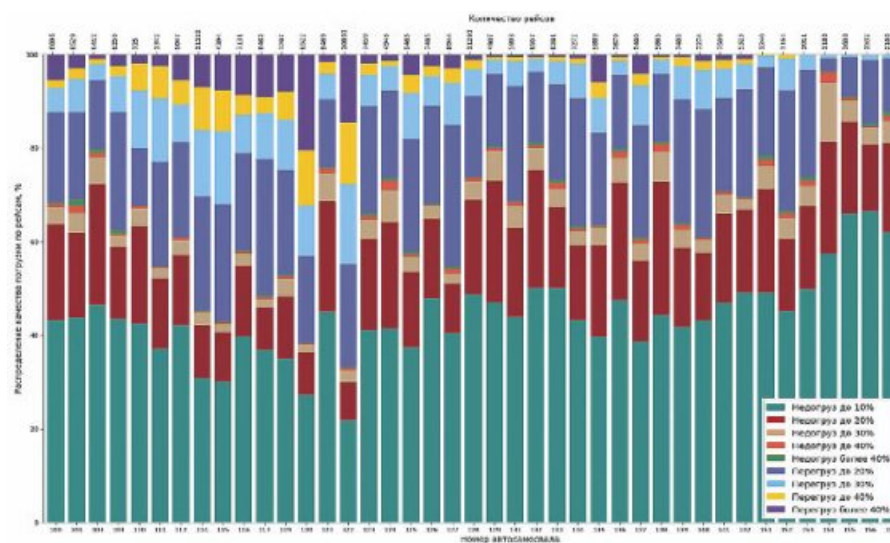


Рис. 5
Распределение качества погрузки автосамосвалов по вскрышной породе

Fig. 5
Distribution of the dump truck loading quality for overburden

на руде. И также присутствуют аномально-максимальные перегрузы самосвалов под номерами 120 и 122 на высоких диапазонах.

Однако стоит учитывать тот факт, что значения плотности при погрузке принимаются исходя из средней плотности преобладающего типа горной массы в забое, не учитываются степень разрыхления в результате буровзрывных работ, в связи с чем, вероятно, преобладает количество перегруженной горной техники на вскрышных работах. Поэтому для повышения качества управления потоками горной массы необходимо учитывать не только массу автосамосвала с учетом коэффициента налипания в кузове, но и корректировать коэффициент разрыхления перед каждой погрузкой на однородных блоках. А в блоках сложной структуры необходимо реализовывать экспресс-анализ типа пород по контрастным признакам на основе нейронных сетей с целью установления средней плотности в кузове самосвала.

Обсуждение результатов

В конечном итоге проведенный анализ системы диспетчеризации не отвечает на ряд возникающих вопросов:

- почему перегруз автосамосвалов преимущественно возникает лишь на вскрышных работах?
- как возникают аномальные рейсы с перегрузом автосамосвала на более чем 100% от его технической грузоподъемности?
- как влияет перегруз автосамосвала на ходимость

техники в данных горно-геологических условиях? и т.д.

Ответов на поставленные вопросы нет по различным причинам, связанным как с работой самой системы диспетчеризации, например, с дефектами процесса верификации веса загруженной горной массы с грузоподъемностью самосвала, так и с интеграциями с периферийными системами. Информация из систем диспетчеризации горно-транспортного комплекса может давать количественные оценки доли влияния персонала на показатели эффективности работы горного оборудования, но в отрыве от понимания технологического процесса целиком могут быть допущены ошибки интерпретации результатов работы предприятия. Получить ответы на поставленные вопросы возможно лишь при комплексном анализе данных нескольких систем автоматизации, которые могут предоставить данные по учету типа ремонтных работ оборудования, качеству буровзрывных работ, учету итоговых показателей по объемам перевезенной горной массы и т.д.

Кроме того, рассмотренная система диспетчеризации [5], как и многие другие системы, имеет изолированный от других систем интерфейс, а интеграция с другими системами отсутствует либо завязана слабо и сугубо для получения необходимой информации для самой системы. При этом сильно страдает качество передачи информации от системы к системе, поскольку отсутствуют единые унифицированные структуры передаваемых данных в горнотехнической системе.

Заключение

Рассмотренная локализованная система с точки зрения классификации источников получаемых данных при функционировании горнотехнических систем относится к данным горного оборудования и не учитывает свойства горного массива, среды и внешних систем, поэтому такое локализованное исполнение не позволяет делать выводы по развитию горных работ и технологий, вырабатывать принципы и дискретизацию сбора информации для построения методов прогнозной аналитики эффективного управления горным производством.

Также при анализе данных нескольких систем остро встает вопрос отсутствия каких-либо связующих параметров между локализованными автоматизированными системами. Такие параметры смогли бы идентифицировать как внутри технологического передела, так и за его пределами, потоки минерального сырья, прошедшие через предшествующие технологические процессы. Такого рода

уникальный параметр дает возможность отслеживания полной картины на пути следования сырья на всех цепочках технологических процессов. Например, увязка качества забоя с качеством погруженной в самосвал горной массы происходит по высокоточному позиционированию стрелы экскаватора в момент погрузки. Но после разгрузки самосвала в бункер или перегрузочный пункт качество данного забоя теряется в общем потоке горной массы на последующих стадиях переработки. Поэтому внедрение во все автоматизированные системы сквозного индикатора для выделенного определенного объема горной массы позволит не только эффективно управлять процессами добычи, но и выявлять различного рода зависимости, которые на данном этапе развития информационных систем не очевидны, когда связь между технологическими процессами происходит косвенными способами – по времени или локации.

Список литературы

1. Шибанов Д.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. Тарификация влияющих факторов на работу современных карьерных экскаваторов по себестоимости экскавации горной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S1-2):24–33.
2. Зыков П.А., Зварыч Е.Б., Карасев А.Н. Повышение эффективности открытых горных работ. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020;(3):70–79. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-70-79>
3. Menegaki M., Michalakopoulos T., Roumpos C. Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2019;10(2–4):189–204. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2019.104447>
4. Litvin O., Litvin Ya. Evaluation of Effect of the Excavator Cycle Duration on its Productivity. *E3S Web of Conferences*. 2020;174:01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401010>
5. Temkin I., Klebanov D., Deryabin S., Konov I. Predictive Analytics in Mining. Dispatch System Is the Core Element of Creating Intelligent Digital Mine. *Communications in Computer and Information Science*. 2020;1201:365–374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_28

References

1. Shibanov D.A., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Tariffing of the influencing factors on the work of the modern mine excavators at actual cost of rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S1-2):24–33. (In Russ.)
2. Zykov P.A., Zvarych E.B., Karasev A.N. Maximizing of open-pit mining efficiency. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020;(3):70–79. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-70-79> (In Russ.)
3. Menegaki M., Michalakopoulos T., Roumpos C. Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2019;10(2–4):189–204. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2019.104447>
4. Litvin O., Litvin Ya. Evaluation of Effect of the Excavator Cycle Duration on its Productivity. *E3S Web of Conferences*. 2020;174:01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401010>
5. Temkin I., Klebanov D., Deryabin S., Konov I. Predictive Analytics in Mining. Dispatch System Is the Core Element of Creating Intelligent Digital Mine. *Communications in Computer and Information Science*. 2020;1201:365–374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_28

Информация об авторах

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, зав. отделом теории проектирования освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: rylnikova@mail.ru

Клебанов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, зав. лабораторией интеллектуальных систем и цифровых технологий, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Князькин Егор Алексеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем и цифровых технологий, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Information about the authors

Marina V. Rylnikova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of the Department of Subsoil Development Design Theory, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: rylnikova@mail.ru

Dmitry A. Klebanov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Intelligent Systems and Digital Technologies, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: Klebanov_d@ipkonran.ru

Egor A. Knyazkin – Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of Laboratory of Intelligent Systems and Digital Technologies, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 14.12.2022

Revised: 19.01.2023

Accepted: 20.01.2023