

Анализ влияния освещенности на качество распознавания лазерной сетки машинным зрением

П.В. Черкасов^{1,2}, Я.В. Попинако^{1,2}, М.С. Никитенко^{1,2}✉

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация
✉ ltd.mseng@gmail.com

Резюме: Основной целью исследования являлся анализ качества распознавания лазерной сетки в различных диапазонах значений освещенности для применения в промышленных условиях подземных горных выработок, открытых горных работ и на производственных площадках. В частности, устанавливались зависимости влияния уровня освещенности на качество распознавания сетки световых маркеров системой машинного зрения. Объектами исследования являлись видеоизображения, а предметом – алгоритмы их обработки системой машинного зрения и значения параметра их качественного распознавания. В результате работы авторами выделены условия наиболее качественного распознавания световых маркеров в виде лазерной сетки, проецируемой на поверхность. В соответствии с разработанной методикой получен результат серии экспериментов в лабораторных условиях с различной дискретностью значений освещенности. Расчет показателя качественного распознавания при сравнении проекции сетки с шаблоном производился посредством поиска групп пикселей, наиболее схожих с указанным объектом, и выделения их с указанием соответствия в процентах. В случае недостаточности значения параметра группы пикселей применялись операции эрозии и дилатации, позволяющие изменить параметры соседствующих пикселей до значений, обеспечивающих установление геометрического соответствия. Получены результаты в виде зависимостей показателя качественного распознавания ячеек сетки световых маркеров от освещенности в лабораторных условиях. Сделан вывод об оптимальном диапазоне освещенности, при котором качество распознавания сетки световых маркеров стабильное. Полученные результаты могут применяться в промышленности, в том числе в горнодобывающей отрасли при измерении объема объектов системой машинного зрения, дополненной лазерной сеткой световых маркеров.

Ключевые слова: машинное зрение, распознавание образов, геометрическое соответствие, световой маркер, лазерная сетка, управляемый выпуск, выпуск угля подкровельной толщи, измерение объема

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №1023033000581-6).

Для цитирования: Черкасов П.В., Попинако Я.В., Никитенко М.С. Анализ влияния освещенности на качество распознавания лазерной сетки машинным зрением. *Горная промышленность*. 2024;(5S):110–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-110-115>

Analyzing the effect of illumination on machine vision detection of the laser grid shape

P.V. Cherkasov^{1,2}, Ya.V. Popinako^{1,2}, M.S. Nikitenko^{1,2}✉

¹ Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation

² Kuzbass State Technological University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation
✉ ltd.mseng@gmail.com

Abstract: The main purpose of the study was to analyze the quality of laser grid shape detection in various ranges of illumination intensity for industrial application in conditions of underground and open-pit mining and on production sites. In particular, the dependences were established of the illumination level effect on the quality of the laser grid shape detection with the machine vision. Images were used as the study objects, while the subject was the machine vision algorithms and the values of the qualitative

shape detection parameters. As a result, the authors have identified the conditions for the most effective shape detection of a laser grid projected onto the surface. In accordance with the developed methodology, the result of a series of laboratory tests was obtained with different light discreteness. In case of insufficient value of the parameter for a group of pixels, erosion and dilation operations were used, allowing to change the parameters of adjacent pixels to the values that would ensure the shape detection. The results are obtained in the form of qualitative dependence of the laser grid cells shape detection on illumination in laboratory conditions. The conclusion is made about the optimal illumination range, at which the quality of the laser grid shape detection is stable. The obtained results can be applied in various industries, including the mining industry, when measuring the objects volume with machine vision in combination with a laser grid.

Keywords: machine vision, image recognition, shape detection, light line projection, laser grid, controlled coal output, longwall top coal caving, volume measurement

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project FWEZ-2024-0025 "Development of scientific foundations for the creation of autonomous and automated mining machines, equipment as well as technical and control systems based on promising digital and robotic technologies" (Reg. No. 1023033000581-6).

For citation: Cherkasov P.V., Popinako Ya.V., Nikitenko M.S. Analyzing the effect of illumination on machine vision detection of the laser grid shape. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):110–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-110-115>

Введение

Методы машинного зрения активно начинают использоваться в горнодобывающей промышленности [1–3] для решения целого спектра задач [4; 5] как при открытой, так и подземной отработке месторождений. Кроме того, ранее авторами были описаны перспективные направления применения систем машинного зрения, дополненные световыми маркерами. В частности, при ведении открытых горных работ применение методов машинного зрения перспективно для распознавания траектории движения и состояния дорожного покрытия перед автономными транспортными средствами [6]. В условиях подземной отработки – для оценки объёма горной массы [7; 8], поскольку в связи с исчерпаемостью легкодоступных угольных пластовых месторождений возрастает актуальность отработки мощных пластов. В работах [9; 10] показана перспективность технологии отработки мощных пластов с выпуском на забойный конвейер, а также предложена конструкция секции крепи с управляемым выпуском [11; 12]. Такая технология и конструкция крепи предполагает высокую степень автоматизации и минимальное присутствие человека в забое. Для поддержания требуемой производительности группы секций предложено ввести в систему управления секцией автоматизированный контроль объёма выпускаемой горной массы на забойный конвейер [13; 14], для чего ранее авторами был предложен способ измерения объёма объектов без физического контакта с ними [7; 8], основанный на работе системы машинного зрения, дополненной лазерными световыми маркерами в виде сетки. В соответствии с разработанным способом оценки объёма и реализующим устройством генераторы лазерных линий проецируют на поверхность исследуемого объекта контрастную сетку. С использованием камеры машинного зрения определяются высоты объекта в точках пересечения лазерных линий, что впоследствии позволяет создать двумерный массив данных, на основе которых определяется объём объекта. Поскольку повышение уровня освещенности снижает качество распознавания спроецированной лазерной линии в помещении при дневном освещении [6], как показано на примере лазера 7 МВт красного цвета с длиной волны 635 нм (рис. 1), очевидно, что применение совокупности

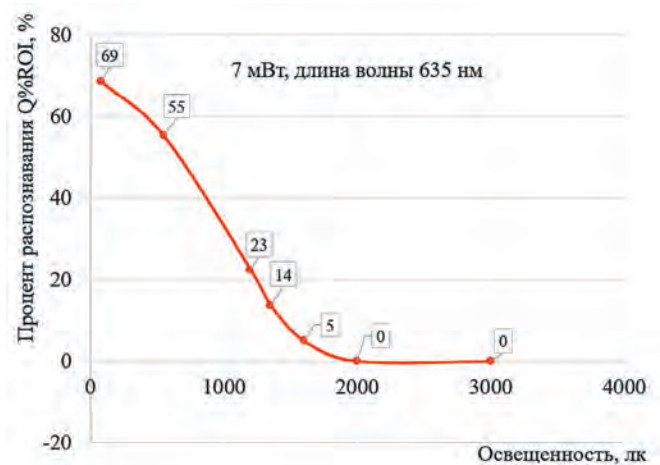


Рис. 1
Снижение качества распознавания проекции генератора линии 7 МВт с длиной волны 635 нм при падении уровня освещенности

Fig. 1
Deterioration in the quality of shape detection of the 7 MW laser projected line with the wavelength of 635 nm when the illumination intensity drops

таких лазерных маркеров или разность в условиях применения внутри зданий и сооружений промышленного назначения требует проведения натурных измерений параметров качественного распознавания изображения их проекций.

Материалы и методы

В соответствии с поставленной задачей разработана методика распознавания проекции сетки световых маркеров для действующих нормативных диапазонов освещенности в промышленных условиях. Техническая реализация заключается в следующем. Изображение лазерной проекции на поверхности принимается камерой, оцифровывается и передается в программу обработки. В цифровом виде оцифрованное изображение представляет собой двумерную матрицу, ячейки (пиксели), каждый из которых несёт информацию о цвете, значении яркости пикселя, координаты

натах расположения. После передачи на ЭВМ изображение обрабатывается функциями СМЗ, в результате чего могут быть изменены параметры цвета (в случае цветного изображения), а также измерены яркость пикселя (в случае изображения в оттенках серого) или яркости пикселей для каждой цветовой составляющей. Далее на основе анализа координат пикселей и их взаимного расположения может устанавливаться геометрическое соответствие заданному объекту. В данном исследовании заданным объектом является заранее созданный шаблон сетки в таких условиях, что геометрическое соответствие приближено к 100%. В соответствии с функцией СМЗ производится сравнение с шаблоном посредством поиска групп пикселей, наиболее схожих с указанным объектом, и выделение их с указанием соответствия в процентах (и при полном соответствии этот показатель равен 100%). В серии проведенных экспериментов шаблон является сеткой, состоящей из 112 ячеек. Показатель качества распознавания Q при сравнении проекции сетки с шаблоном выражен в процентах от полного региона интереса (Region of Interest – ROI) и принят для обозначения как ROI.

Проведение испытаний по определению влияния освещенности на качественное распознавание лазерной сетки машинным зрением в граничных условиях для промышленных площадок (по ГОСТ Р 55710–2013) включало следующие этапы:

1. Установить уровень освещенности 0 лк для создания шаблона.
2. Удостовериться в перпендикулярности измерительного участка относительно оптической оси камеры и обеспечить его центровку.
3. Зафиксировать камерой машинного зрения (Basler acA3088-57um) изображение проекции лазерной сетки на измерительном участке и передать изображение на вычислительное устройство.
4. Создать шаблон для дальнейшего выявления геометрического соответствия.
5. Изменять освещенность с определенным шагом дискретизации.
6. Произвести видеофиксацию изображения проекции сетки с установленным уровнем освещенности.
7. Определить регион интереса (ROI) на полученном изображении.
8. Выявить соответствие проекции сетки шаблону в изменяющихся условиях освещенности.
9. Определить зависимости влияния освещенности на распознавание геометрического соответствия шаблону лазерной сетки в заданных диапазонах значений.

Обнаружение геометрического соответствия производилось в несколько этапов. Первый этап – выделение прямоугольной области региона интереса (ROI) проекции сетки лазерных линий, длина которой составила 1400 пикселей, а высота – 1200 пикселей. Такие размеры региона интереса определены по результатам серии лабораторных измерений как необходимые и достаточные для дальнейшего применения. Далее в границах определенного региона интереса создан шаблон проекции сетки лазерных линий при нулевом уровне освещенности (показан на рис. 2), после чего он распознавался посредством машинного зрения. Для достижения максимального качества распознавания геометрического соответствия применялись функции математической морфологии структурирования соседних пикселей (эрозии и дилатации).

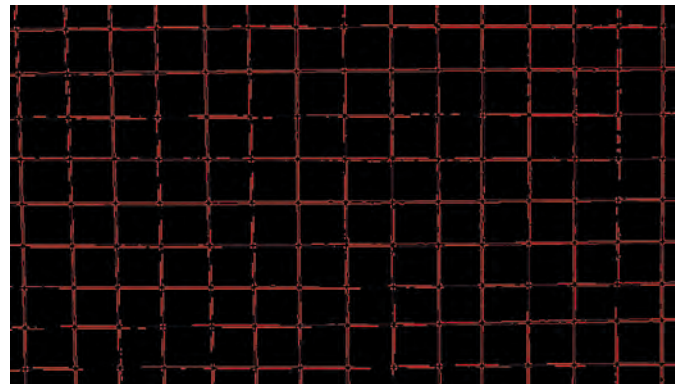


Рис. 2
Шаблон для обнаружения геометрического соответствия лазерной сетки при нулевом значении освещенности

Fig. 2
A template for the laser grid shape detection in case of zero-level illumination intensity

Качество распознавания характеризовалось процентным значением соответствия шаблону и было обозначено как процент распознавания Q%ROI.

Результаты и обсуждение

Применение предложенного способа для решения задачи оценки объема горной массы на питателе секции крепи [7] имеет нормативно установленные условия применения в соответствии с приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 №505 «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»¹ и ГОСТ Р 55733–2013 «Освещение подземных горных выработок»². По данным источников на участках, где должен производиться выпуск угля, граничные значения освещенности составляют от 2 до 15 лк.

В представленных пределах проведена серия экспериментов в лабораторных условиях, где уровень освещенности устанавливался с использованием источников света на основе светодиодов, при этом не использовался дневной свет, а дискретность значений освещенности составляла 2 лк в диапазоне значений 0...16 лк. Световой поток являлся равномерным и непрерывным, стробоскопический эффект отсутствовал, что соответствует регламенту нормативной документации ГОСТ Р 55733–2013 «Освещение подземных горных выработок».

Исходные получаемые камерой изображения показаны на рис. 3, где видно, что визуальная разница качества распознавания отсутствует. Тем не менее значения качественного показателя распознавания ячеек сетки Q%ROI снижаются при увеличении уровня освещенности, но незначительно, что можно увидеть на графике (рис. 4). При этом функция, описывающая снижение, принимает линейный характер в установленном диапазоне значений освещенности.

Полученные результаты позволили сделать вывод, что в условиях освещенности, соответствующих установленным в горных выработках, её влияние на качество распознавания геометрического соответствия не является

¹ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: приказ Ростехнадзора от 8 дек. 2020 г. №505. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372372/ (дата обращения: 27.06.2024).

² ГОСТ Р 55733–2013 «Освещение подземных горных выработок. Основные требования и методы измерений». Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293774/4293774756.pdf> (дата обращения: 27.06.2024).

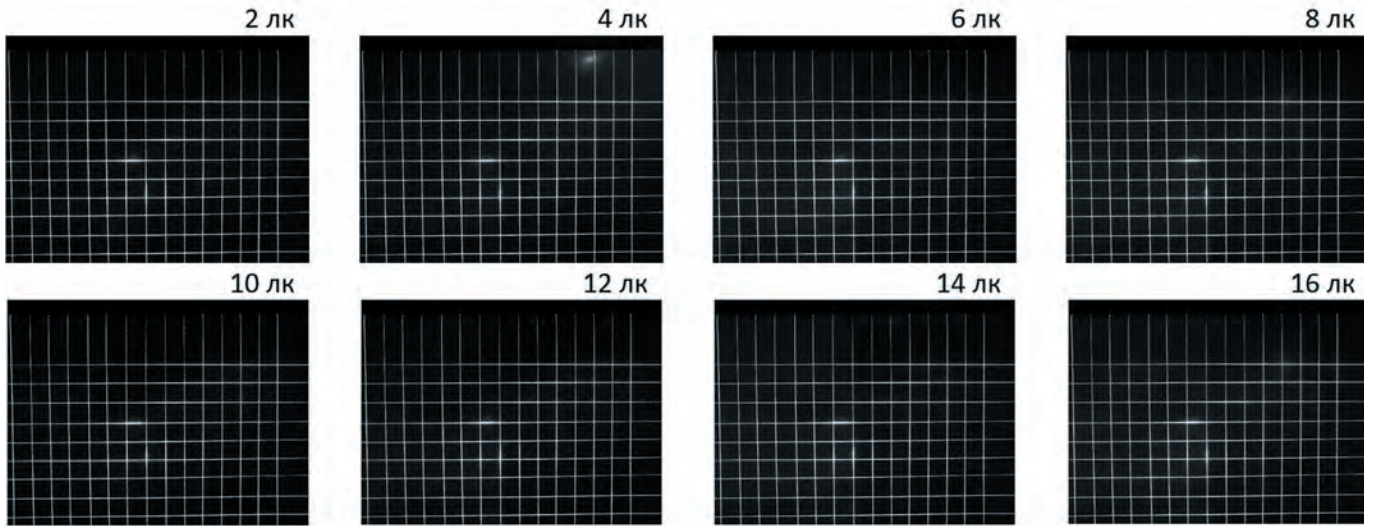


Рис. 3
Изображения лазерной сетки, полученные с камеры при освещённости в диапазоне значений 2...16 лк

Fig. 3
Laser grid images obtained with a camera within the illumination intensity range from 2 to 16 lx

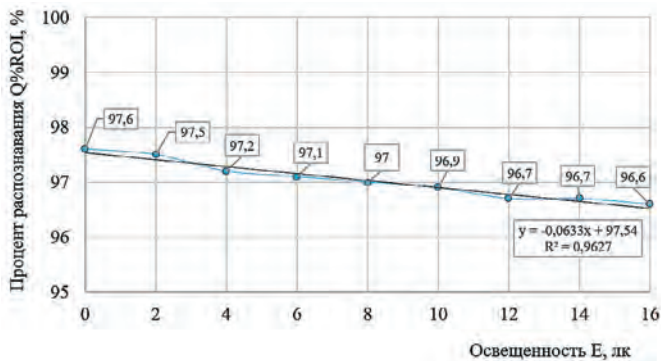


Рис. 4
Зависимость значений процента распознавания ячеек сетки Q%ROI от освещённости в диапазоне 0...16 лк

Fig. 4
The dependence of the Q%ROI shape detection quality on the illumination intensity within the range from 0 to 16 lx

значимым, поскольку изменение в уровне качества распознавания при сопоставлении шаблона составило менее 1%. Таким образом, в условиях горных выработок качественное распознавание световых маркеров, генерируемых 7 мВт генераторами линии красного цвета с длиной волны 635 нм системой машинного зрения, обеспечивается во всем диапазоне нормативных значений освещённости. Далее исследуемый диапазон значений освещённости был расширен.

Для промышленных объектов и производственных помещений по ГОСТ Р 55710–2013 нормы освещённости внутри зданий составляют не более 500 лк (кроме объектов здравоохранения). В представленных пределах также проведены серии экспериментов. Примеры исходных получаемых камерой изображений с дискретностью освещённости 50 лк показаны на рис. 5. Зависимость значений качествен-

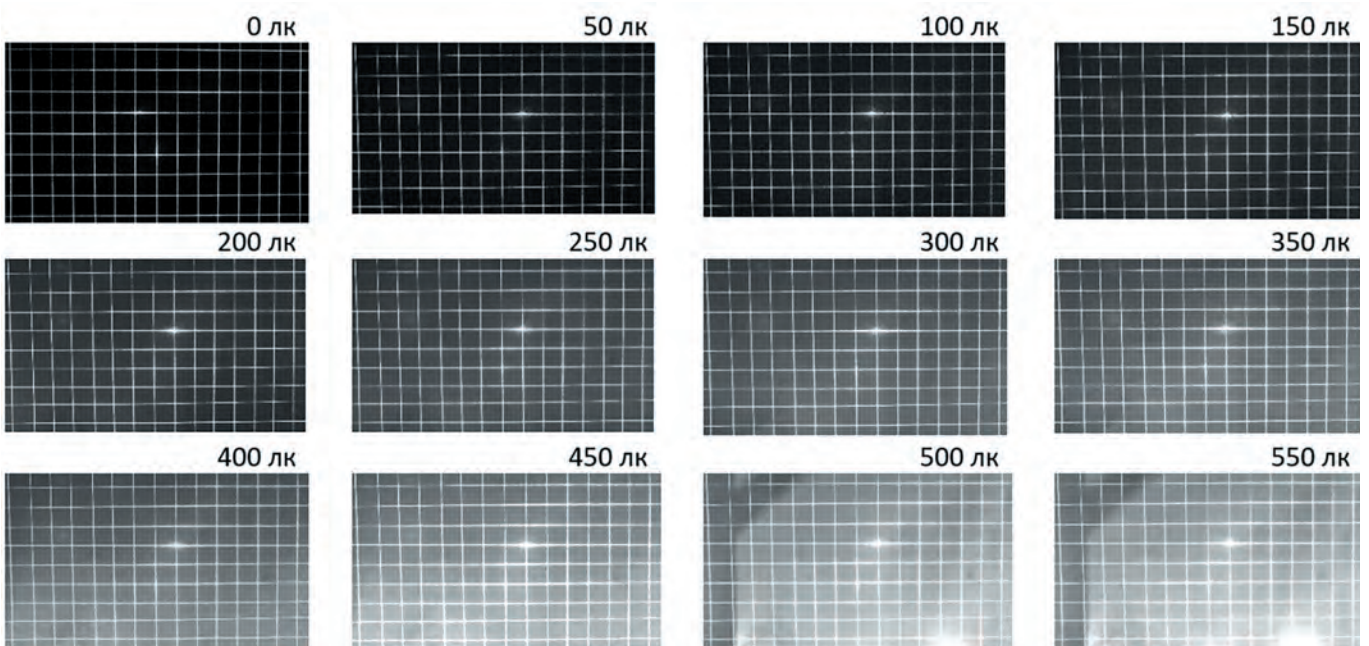


Рис. 5
Изображения лазерной сетки, полученные с камеры освещённости в диапазоне значений 0...550 лк

Fig. 5
Laser grid images obtained with a camera within the illumination intensity range from 0 to 550 lx

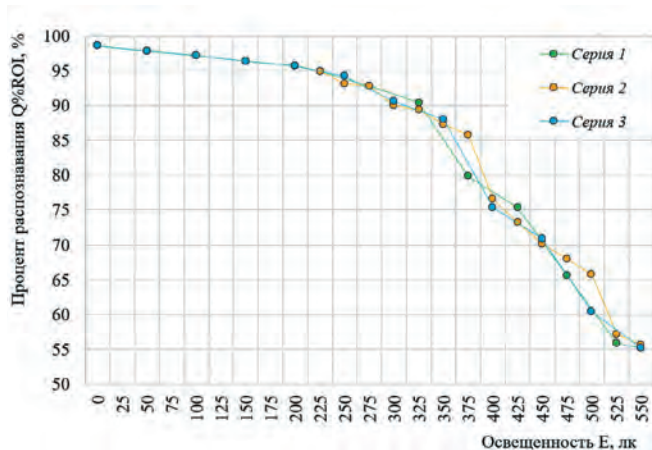


Рис. 6
Зависимость значений процента распознавания ячеек сетки от освещённости в диапазоне 0...550 лк

Fig. 6
The dependence of the Q%ROI shape detection quality on the illumination intensity within the range from 0 to 550 lx

ного показателя распознавания ячеек сетки Q%ROI от освещённости в диапазоне 0...550 лк по результатам сравнения шаблона с изображением системой машинного зрения представлена на рис. 6.

Результаты позволили выделить условия наиболее качественного распознавания световых маркеров в виде лазерной сетки, проецируемой на объект. По полученным данным сделан вывод, что линейность функции, описыва-

ющей снижение качественного показателя распознавания ячеек сетки Q%ROI, обеспечивается в диапазоне значений освещённости 0...200 лк. В диапазоне значений освещённости 0...300 лк обеспечивается максимально качественное распознавание сетки со значениями Q%ROI от 90,6% до 97,5 %. При увеличении освещённости выше 300 лк качество распознавания сетки значительно менее стабильное, таким образом, применение предложенного способа применения машинного зрения в комбинации с накладываемой сеткой световых маркеров будет иметь максимальную ожидаемую эффективность применения для крытых производственных помещений и площадок и помещений с освещённостью до 300 лк.

Заключение

В результате проведённых исследований на основе разработанной методики распознавания машинным зрением проекции сетки лазерных линий при различных уровнях освещённости определено, что в задаче распознавания сетки световых маркеров, дополняющих видеосцену в условиях промышленной площадки, наиболее стабильное и высокое качество распознавания достигается при освещённости до 300 лк. В шахтных условиях, где производится выпуск угля, пороговые значения освещённости 0...16 лк, существенно не влияют на качество распознавания 7 мВт генераторов линии с длиной волны 635 нм и могут успешно применяться в составе систем машинного зрения.

Список литературы / References

1. Ali D., Frimpong S. Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector. *Artificial Intelligence Review*. 2020;53:6025–6042. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09841-6>
2. Hyder Z., Siau K., Nah F. Artificial intelligence, machine learning, and autonomous technologies in mining industry. *Journal of Database Management*. 2019;30(2):67–79. <http://doi.org/10.4018/JDM.2019040104>
3. Barnewold L., Lottermoser B.G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):747–757. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003>
4. Калашников В.А., Соловьев В.И. Приложения компьютерного зрения в горнодобывающей промышленности. *Прикладная информатика*. 2023;18(1):4–21. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2023-18-1-4-21>
Kalashnikov V.A., Soloviev V.I. Applications of computer vision in the mining industry. *Journal of Applied Informatics*. 2023;18(1):4–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2023-18-1-4-21>
5. Huang M.Q., Ninić J., Zhang Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;108:103677. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103677>
6. Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu., Popinako Ya.V., Kizilov S.A. Determining the route and roadway condition in front of autonomous vehicle. *Proceedings of the Third International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTPEE 2024)*. Vol. 13217. 2024, 1321713. <https://doi.org/10.1117/12.3036935>
7. Кизилов С.А., Баловнев Е.А., Черкасов П.В., Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю., Попинако Я.В. Подходы к автоматизированной оценке объема и состава горной массы в процессе выпуска угля на забойный конвейер. В кн.: *Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: труды Всерос. науч.-практ. конф., г. Новокузнецк, 15–16 дек. 2022 г.* Новокузнецк: СибГИУ; 2022. С. 20–25.

8. Никитенко М.С., Кизилов С.А., Захаров Ю.Н., Худоногов Д.Ю., Игнатова А.Ю. Измерение производительности питателя при выпуске угля из подкровельной толщи на основе технологии машинного зрения. *Горные науки и технологии*. 2022;7(4):264–273. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>
Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Zakharov Yu.N., Khudonogov D.Yu., Ignatova A.Yu. Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):264–273. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>
9. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Клишин В.И., Крамаренко В.А. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи. В кн.: *Имитационное моделирование. Теория и практика: материалы 9-й Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, г. Екатеринбург, 16–18 окт. 2019 г.* Екатеринбург: УрГПУ; 2019. С. 540–547.
10. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;(1):162–174.
Klishin V.I., Klishin S.V. Current state and direction of development of thick coal seams excavation technology by powered roof supports with controlled coal discharge. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(1):162–174. (In Russ.)
11. Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В., Клишин С.В., Худынцев Е.А. Секция механизированной крепи очистного забоя с устройством регулируемого выпуска угля. Патент РФ №2021131401, 04.04.2022.
12. Клишин В.И., Худынцев Е.А. Создание механизированных комплексов с выпуском для подземной разработки мощных угольных пластов. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2022;(6):96–106. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-6-96-106>
Klishin V.I., Khudintsev Ye.A. Designing mechanized support complexes with coal release for underground development of thick coal seams. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022;(6):96–106. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-6-96-106>
13. Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Направления совершенствования разработки мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи. В кн.: *Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017): материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 18–21 апр. 2021 г.* Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева; 2017. С. 57–63.
14. Клишин В.И., Шундулиди И.А., Ермаков А.Ю., Соловьев А.С. *Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля*. Новосибирск: Наука; 2013. 248 с.

Информация об авторах

Черкасов Павел Вадимович – инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: cherkasov.pavel.v@gmail.com

Попинако Ярослав Владимирович – инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0007-2788-6074>; e-mail: popinakoya@gmail.com

Никитенко Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией перспективных методов управления горнотехническими системами, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Information about the authors

Pavel V. Cherkasov – Engineer, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: cherkasov.pavel.v@gmail.com

Yaroslav V. Popinako – Engineer, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-2788-6074>; e-mail: popinakoya@gmail.com

Mikhail S. Nikitenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory for Advanced Control Methods of Mining Engineering Systems, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Article info

Received: 19.08.2024

Revised: 02.10.2024

Accepted: 09.10.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.08.2024

Поступила после рецензирования: 02.10.2024

Принята к публикации: 09.10.2024