

## Научная статья

УДК 622.41 : 004.932.2

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-77-84

Черкасов Павел Вадимович\*, Худоногов Данила Юрьевич, Кизилов Сергей Александрович, Никитенко Михаил Сергеевич

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

\* для корреспонденции: cherkasov.pavel.v@gmail.com

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ****Информация о статье**

Поступила:

15 января 2026 г.

Одобрена после  
рецензирования:

15 марта 2026 г.

Принята к печати:

15 апреля 2026 г.

Опубликована:

04 июня 2026 г.

**Ключевые слова:**

машинное зрение, угольная шахта, запыленность, влажность, работоспособность, световой маркер, распознавание

**Аннотация.**

Внедрение технологии машинного зрения в автоматизированные системы управления горными машинами в условиях угольных шахт сталкивается с проблемой обеспечения их работоспособности в специфических условиях подземных горных выработок. Ключевым ограничением является качество распознавания машинным зрением контролируемых объектов, на которое, главным образом, влияют такие нормируемые параметры рудничной атмосферы, как запыленность, влажность и освещенность. Целью исследования является анализ влияния данных параметров на качество распознавания световых маркеров системой машинного зрения. В статье проведен краткий анализ причин возникновения пыли, включая дисперсный состав и концентрации в выработках, а также условий возникновения влажности, формируемых системами пылеподавления. Представлены требования к системам освещения для обеспечения стабильной работы оптических систем цифровых видеокамер. Экспериментальная часть работы выполнена на лабораторном макете изолированного участка, моделирующем условия рудничной атмосферы по пыли и влажности. В ходе эксперимента исследовалась зависимость коэффициента распознавания светового маркера от концентраций твердых взвешенных частиц при высокой относительной влажности. Результаты показали, что в пределах нормативных концентраций пыли до  $150 \text{ мг/м}^3$  и относительной влажности до 80% качество распознавания проекции маркера с применением технологии машинного зрения остается высоким – на уровне не ниже 74%. Полученные данные позволили определить граничные условия применения оптических систем на основе технологии машинного зрения, сформировали основу для разработки адаптивных алгоритмов обработки изображений, а также подтвердили возможность эффективного применения технологии машинного зрения на основе световых маркеров в моделируемых условиях.

**Для цитирования:** Черкасов П.В., Худоногов Д.Ю., Кизилов С.А., Никитенко М.С. Оценка влияния запыленности и влажности воздуха горных выработок на эффективность машинного зрения // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 2 (184). С. 77-84. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-77-84, EDN: WPRIKO

**Введение**

Внедрение автоматизированных систем управления, базирующихся на использовании современных цифровых технологий, охватывает в том числе горнодобывающую отрасль, демонстрируя высокую эффективность при решении различных технологических задач в угольных шахтах [1].

В контексте современных систем управления [2-4] машинное зрение (МЗ) упоминается как одна из перспективных технологий, применяемых в систе-

мах мониторинга технологических процессов и контроля состояния элементов горношахтного оборудования, как при открытой, так и при подземной отработке месторождений, а также управления и корректировки режимов работы горношахтного оборудования. Технология МЗ находит применение для выполнения сложных измерительных операций, таких как трехмерная реконструкция поверхности объектов [1], монокулярные системы нашли

применение при мониторинге окружающей среды [5], контроле состояния оборудования [6] и т. д.

Принцип работы технологии МЗ заключается в программной обработке фото- и видеоданных, получаемых с промышленных камер, для последующего автоматического выделения и анализа целевых областей, так называемых регионов интереса (RoI). На основе этого анализа формируются соответствующие управляющие сигналы [2–4].

Однако следует отметить, что эффективность технологии МЗ снижается в условиях недостаточной видимости [7], на которую в горной выработке влияют пыль, влажность и освещенность как наиболее критичные параметры эксплуатационной среды.

Таким образом, анализ влияния нормируемых параметров рудничной атмосферы в подземных горных выработках угольных шахт на работоспособность технологии машинного зрения при различных показателях является актуальной научной задачей.

### **Запыленность среды**

Воздушная среда в выработках характеризуется наличием взвешенных частиц угольной и породной пыли, которые могут вносить искажения в процесс формирования оптического сигнала [8–10].

Состав рудничной атмосферы помимо смеси газов и паров включает твердые взвешенные частицы, являющиеся дисперсной фазой рудничной пыли [11]. При этом размеры частиц пыли градуируются в диапазонах [12]:

- от 100 мкм до 10 мкм – крупные частицы, видимые невооруженным глазом со скоростью осаждения более 1 мм/с. Такие частицы составляют меньшую часть общего объема рудничной атмосферы;
- от 10 мкм до 0,25 мкм – микроскопические частицы, обнаруживаемые оптическими микроскопами со скоростью осаждения 0,01-1 мм/с. Частицы размером до 5 мкм, как правило, составляют более 90 % [13] объема рудничной атмосферы горной выработки и, по предположению, наиболее проблематичны для систем МЗ;
- менее 0,25 мкм – субмикроскопические частицы, требующие электронной микроскопии для обнаружения со скоростью осаждения менее 0,01 мм/с.

Источники пылевыведения в свою очередь подразделяются на первичные (вследствие механического разрушения горных пород вся образующаяся пыль переходит во взвешенное состояние) и вторичные (во взвешенное состояние переходит отложившаяся слоем угольная пыль) [11].

Процесс пылеобразования и распределения витающей (находящейся в рудничной атмосфере во взвешенном состоянии) угольной пыли в горных выработках представляет собой сложное явление, определяемое совокупностью геологических и технологических факторов.

Основными источниками пылеобразования в шахтных условиях являются технологические процессы добычи угля [12, 14]. Наибольший вклад (до 65% общего объема пыли) [12] вносит работа добычных и проходческих комбайнов, которые разрушают угольный массив по принципу скола. Этот

механизм приводит к образованию частиц с острыми гранями – параллелепипедов, эллипсоидов и пластин [15]. Обрушение угля дает до 25% пылевой массы, при этом формируются частицы более округлой формы [15, 16]. Также известно о зависимости дисперсного состава пыли от степени метаморфизма угля [17]. Для углей марок К и Ж (коксовых и жирных) характерно мономодальное распределение частиц с преобладанием фракций менее 37 мкм, причем с ростом степени метаморфизма доля мелких фракций увеличивается на 20-25% [17]. В отличие от них, угли марок Д и Г (длиннопламенные и газовые) демонстрируют полимодальное распределение с выраженными пиками в диапазонах 38-45 мкм и 66-75 мкм соответственно [17].

Таким образом, пылевой режим шахты зависит от природных условий залегания пласта, свойств угля и особенно от применяемых системы разработки, способов выемки угля и средств борьбы с пылью [11, 13].

Концентрации пыли в рудничном воздухе существенно варьируются от 0,06 до 50 г/м<sup>3</sup> на различных участках шахты в зависимости от конкретного производственного процесса [18], что требует дифференцированного подхода к организации мероприятий по пылеподавлению и настройке камер МЗ.

В соответствии с действующими нормативами содержание пыли в воздухе рабочей зоны рудничной атмосферы характеризуется среднесменной предельно допустимой концентрацией ПДК<sub>сс</sub>, которая составляет 2-10 мг/м<sup>3</sup> [19].

Однако практика показывает, что в реальных условиях угледобычи достижение нормативных ПДК<sub>сс</sub> часто оказывается затруднительным, поскольку мощное высокопроизводительное оборудование провоцирует пылевыведение, зачастую превышающее возможности систем пылеподавления и вентиляции.

Технологическая необходимость обеспечения непрерывности производственного цикла часто ограничивает время на мероприятия по нормализации воздушной среды, что приводит к систематическому превышению установленных гигиенических нормативов. Таким образом, соблюдение технически достижимого уровня (ТДУ) [20], представляющего собой остаточные концентрации твердых взвешенных частиц в результате применения всех средств и способов борьбы с пылью в данных условиях, является эффективным способом контроля пылевой обстановки в горной выработке.

Величина ТДУ запыленности в зависимости от пылеобразующей способности углей и эффективности способов и средств пылеподавления должна быть до 150 мг/м<sup>3</sup> [20] в рудничном воздухе после обеспыливающей (лабиринтной, туманообразующей или водяной [11]) завесы, иначе ведение горных работ по проведению выработки и по добыче угля запрещается [20], особенно с учетом того, что на сегодняшний день применение комплекса пылеулавливающих систем не обеспечивает полного отсутствия угольной пыли в выработке [14, 21, 22]. Работа таких систем позволяет удалить из воздуха

лишь основную часть, достигнув неопасных для персонала концентраций. Несмотря на некоторые решения [23-25], направленные на снижение уровня загрязнения и запыления пространства, исключить возможное влияние запыленности на эффективность работы технических средств систем МЗ в горной выработке нельзя.

Таким образом, необходимо исследовать и учитывать потенциальное влияние запыленности рудничной среды угольной шахты на работоспособность технологии машинного зрения.

#### **Влажность среды**

При проведении горных выработок и ведении очистных работ часть мероприятий по борьбе с пылью, взвешенной в воздухе, связана с ее осаждением либо улавливанием посредством применения водяных, туманообразующих и лабиринтно-тканевых завес, водовоздушных эжекторов, пылеулавливающих установок. Размер частиц воды при этом находится в диапазоне от 10 до 50 мкм [12], что не только способствует длительному удержанию водо-воздушной завесы в воздухе, но и обеспечивает повышенную влажность среды в горной выработке. Повышенная влажность в свою очередь также может негативно влиять на работу технических средств реализации МЗ [7].

Превентивные меры, связанные с минимизацией концентраций витающей пыли в рудничной атмосфере, заключаются в предварительном увлажнении угольного пласта. При его увлажнении на 1-3% увеличивается общая влажность пачки в результате гидродинамического воздействия на находящиеся в горном массиве трещины, что приводит к снижению пылеобразования на 75-80%. При влажности угля более 12% пылеобразование практически полностью прекращается [12].

Если превентивные меры минимизации концентраций витающей пыли по какой-то причине недостаточно эффективны, применяются методы мокрого пылеподавления. В результате этого образуются агрегаты частиц, которые затем эффективно осаждаются под действием гравитационных сил [26]. Однако если диаметр капли превышает размер частицы более чем в 5-10 раз, наблюдается эффект обтекания – аэродинамические силы отклоняют пылинку вдоль линий потока воздуха, предотвращая контакт с жидкостью [26].

Таким образом, частицы капель воды могут снижать эффективность работы автоматизированных систем управления на основе технологии машинного зрения и световых маркеров [7] в горной выработке. Причем процесс проведения всех мероприятий, направленных на снижение концентраций витающей пыли в воздухе, обеспечивает относительно высокую влажность рудничной атмосферы до 95%.

#### **Освещенность среды**

Слабая освещенность среды является еще одним из факторов, влияющих на эффективность работы систем МЗ, который проявляется в виде искажений восприятия текстурных характеристик, цветопередачи и геометрических параметров целевых объектов [8-10]. Для обеспечения оптимальных условий функционирования систем на основе МЗ необхо-

димо создавать равномерное освещение по всей протяженности горной выработки [27].

Добиться равномерного освещения возможно светильниками, применяемыми в подземных горных выработках и соответствующими строгим техническим и эксплуатационным требованиям [27]. Прежде всего светильники должны обеспечивать достаточный уровень освещенности и равномерное распределение светового потока, что необходимо для безопасного выполнения технологических операций. Кроме того, конструкция светильников должна исключать явления светового дискомфорта: ослепленность (за счет применения рассеивателей и антибликовых решеток), блескость отраженного света (путем оптимизации углов падения света) и стробоскопический эффект (благодаря стабилизации питания и фазовому смещению в многоламповых системах). Особое внимание уделяется стабильности светового потока в условиях вибрации и запыленности, поскольку колебания яркости более 20% могут привести к дезориентации персонала и ошибкам автоматизированных систем [27].

Кроме того, стоит учитывать, что свет влияет на частицы пыли. Влияние сводится к рассеянию и поглощению света на частицах, что может приводить к снижению контрастности и разрешения получаемых изображений, появлению пространственного шума в виде динамически изменяющейся полупрозрачной завесы, а также к локальным засветкам [8-10]. В результате данные, поступающие в систему машинного зрения, могут содержать артефакты, усложняющие традиционные процедуры обработки. Неоднородность и переменность этих помех создает дополнительную вычислительную нагрузку и требует разработки адаптивных алгоритмов обработки видеосцен.

#### **Результаты и обсуждение**

Согласно результатам проводимых экспериментальных исследований зависимости влияния освещенности на качество распознавания световых маркеров технологией машинного зрения [28, 29], в рабочих (нормативных) диапазонах освещенности горных выработок она не вносит существенного влияния.

На основе проведенного анализа нормированных параметров окружающей среды горной выработки основными факторами, влияющими на распознавание машинным зрением проекций световых маркеров, выступают запыленность и влажность.

Для анализа степени влияния запыленности и влажности на распознавание маркеров, используемых в системах управления, поставлен эксперимент, который заключался в определении коэффициента распознавания системой машинного зрения светового маркера через среду с заданной концентрацией различных твердых взвешенных частиц при заданных значениях относительной влажности. Степень влияния определялась качеством распознавания проекции светового маркера в процентах относительно эталонного изображения при отсутствии любых взвешенных частиц.

Тестовые серии экспериментов проводились на базе специализированной лабораторной установки

(Рис. 1) с изолированным участком длиной 1000 мм. Объем экспериментального участка (ЭУ)  $V_{\text{ЭУ}}$  составил  $0,018 \text{ м}^3$ . Перед его фронтальной частью была установлена цифровая видеочкамера с лазерным генератором светового маркера в виде точки.

Для моделирования запыленности были использованы инертная сланцевая пыль (тонкомолотый негорючий материал, используемый в шахтах как средство пылевзрывозащиты), угольная пыль и

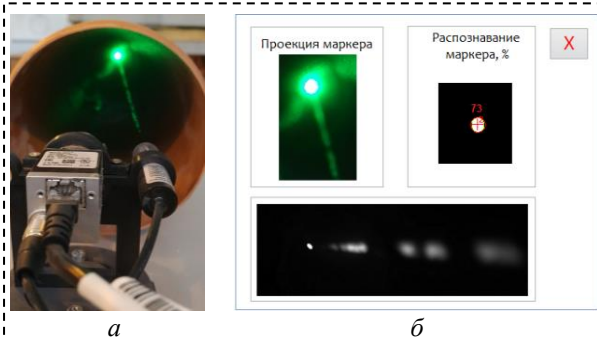


Рис. 1. Процесс проведения эксперимента по определению коэффициента распознавания системой машинного зрения светового маркера через среду с граничными условиями влажности и запыленности, где: а – лабораторный макет; б – интерфейс программного модуля оценки качества распознавания проекции светового маркера

Fig. 1. Experimental process for determining machine vision system's light marker recognition coefficient within humidity and dust concentration boundary condition environments, where: а – laboratory mock-up; б – software module interface for assessing the light marker projection recognition quality

Таблица 1. Часть экспериментов визуализации проекции светового маркера  
Table 1. Partial visualization results from the light marker projection experiments

порода и уголь; концентрация – $2,7 \text{ мг/м}^3$ ; влажность – 15 %	инертная пыль; концентрация $2,16 \text{ мг/м}^3$ ; влажность – 15 %
порода и уголь; концентрация $5,41 \text{ мг/м}^3$ ; влажность – 15 %	порода и уголь; концентрация $5,41 \text{ мг/м}^3$ ; влажность – 80 %

мелкие частицы породы, образующие концентрации твердых взвешенных частиц в  $\text{мг/м}^3$ . Влажность среды обеспечивал генератор пара. Значение относительной влажности 80% принято достаточным в рамках возможности лабораторного обеспечения как стремящееся к насыщенной каплями влаги рудничной среды в процессе обеспечения мероприятий по пылеподавлению на различных участках шахты. Контроль влажности выполнялся поверенным термогигрометром RGK TH-30. Часть экспериментов визуализации проекции светового маркера представлена в Таблице 1.

Зависимость коэффициента распознавания  $K\% \text{CSSP\_DCG}$  (CSSP от англ. – Concentration of Solid Suspended Particles – концентрация твердых взвешенных частиц, а DCG – Dust, Coal, Gungue – Пыль, Уголь, Порода), выраженный в %, от концентрации твердых взвешенных частиц при относительной влажности 80% представлена на Рис. 2. При более низких уровнях влажности значения коэффициента распознавания выше, поэтому такие зависимости не представлены.

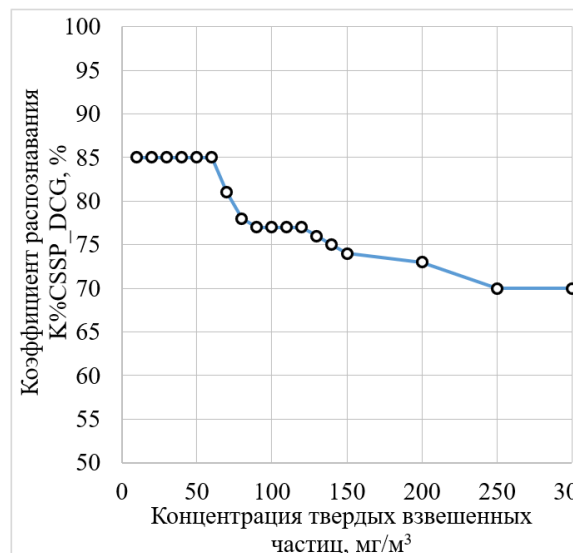


Рис. 2. Зависимость влияния запыленности на качество распознавания проекции светового маркера в % при относительной влажности экспериментального участка 80 %

Fig. 2. Impact of airborne dust concentration on light marker projection recognition quality (%), at 80 % relative humidity in the test section

На графике видно, что при относительной влажности 80% предельно допустимые концентрации твердых взвешенных частиц на уровнях ПДК<sub>сс</sub> –  $10 \text{ мг/м}^3$  и ТДУ остаточных концентраций –  $150 \text{ мг/м}^3$  оказывают минимальное влияние на процент распознавания проекции светового маркера, который сохраняется на уровне не ниже 74%. При этом искусственное увеличение уровня концентрации взвешенных частиц до  $300 \text{ мг/м}^3$  приводит к незначительному снижению качества распознавания проекции маркера до 70%.

#### Заключение

По результатам проведенных исследований было определено, что предельные концентрации взвешенных частиц и влажности не влияют крити-

чески на качество распознавания проекции светового маркера. Искусственное превышение допустимых нормативных концентраций взвешенных частиц может снизить качество распознавания проекции до 70%, однако и при таких значениях распознавание светового маркера выполняется с допустимым качеством.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углеймши 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» (продление).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du Y., Zhang H., Liang L., Zhang J., Song B. Applications of Machine Vision in Coal Mine Fully Mechanized Tunneling Faces: A Review // IEEE Access. 2023. Vol. 11. Pp. 102871–102898. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3317048.
2. Ali D., Frimpong S. Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector // Artificial Intelligence Review. 2020. Vol. 53. Pp. 6025–6042. DOI: 10.1007/s10462-020-09841-6. EDN: DEZQGD.
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. Vol. 30. Is. 6. Pp. 747–757. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.003. EDN: VY-PLPV.
4. Huang M. Q., Ninic 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. Vol. 108. P. 103677. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677. EDN: MVKAZC.
5. Lei W., Liu J. Early fire detection in coalmine based on video processing // Proc. Int. Conf. Commun., Electron. Autom. Eng. Berlin, Germany : Springer, 2012. Pp. 239–245.
6. Yang R., Qiao T., Pang Y., Yang Y., Zhang H., Yan G. Infrared spectrum analysis method for detection and early warning of longitudinal tear of mine conveyor belt // Measurement. 2020. Vol. 165. P. 107856.
7. Власов С. Ю., Кипов М. Х. Машинное зрение в условиях плохой видимости // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 5(115). С. 25–31. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-25-31. EDN: FIBFIC.
8. Cao P., Wang X., Li L., Liu M., Wang M. An improved and advanced method for dehazing coal mine dust images // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. P. 11235. DOI: 10.1038/s41598-025-95912-z.
9. Santa N., Keles C., Saylor J. R., Sarver E. Demonstration of Optical Microscopy and Image Processing to Classify Respirable Coal Mine Dust Particles // Minerals. 2021. Vol. 11. Is. 8. Art. 838. DOI: 10.3390/min11080838.
10. Liu Y., Ma H. Remote on-line detection system for coal dust particle based on machine vision technology // J. Liaoning Tech. Univ. (Nat. Sci.). 2012. Vol. 31. Pp. 822–825.
11. ГОСТ Р 58196—2018. Горное дело. Борьба с пылью на угледобывающих предприятиях. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2018. 16 с.
12. Кабанов Е. И., Корнев А. В., Коршунов Г. И. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело. Методические указания к самостоятельной работе. Санкт-Петербургский горный университет. 2021. 35 с.
13. Чemezov Е. Н. Безопасность подземных горных работ : учебное пособие. Якутск : Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2010. 359 с.
14. ГОСТ Р 55175–2012. Атмосфера рудничная. Методы контроля запыленности. М. : Стандартинформ, 2014. 21 с.
15. Мельник В. В., Ермаков А. Ю., Ванякин О. В., Бородкин П. С. Пылевой фактор при отработке мощных пластов с выпуском подкровельной толщи угля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 175–184. EDN: PGRWNF.
16. Ning S., Zhizeng H. Application of Longwall Top Coal Caving in Challenging Geological Conditions // Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical and Material Engineering (MCM 2015). 2015. Vol. 21. Art. 354.
17. Трубицына Д. А., Подображин С. Н. Умные системы непрерывного автоматического контроля отложений пыли по сети горных выработок угольных шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2021. № 3. С. 6–17. EDN: XWVJZB.
18. Булгаков Ю. Ф., Овчаренко В. Л. Пылевая опасность угольного производства. Донецк : ООО «Цифровая типография», 2017. 234 с.
19. Кудряшов В. В., Кубрин С. С., Костеренко В. Н., Терешкин А. И. Проблемы пылевого контроля в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 89–98. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-89-98. EDN: LPLOVV.
20. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 N 506 (ред. от 08.06.2022) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт».
21. Стародубов А. Н., Кравцов В. П., Зиновьев В. В. Проблемы пылеобразования и мероприятия по обеспечению безопасности и экологичности разработки угольных месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. № 4 (128). С. 99–105. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-99-104. EDN: VRFYVO.
22. Приказ Ростехнадзора от 11.12.2013 № 599 «Об утверждении Федеральных норм и правил в

области промышленной безопасности «Правила безопасности при проведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых».

23. Способ разработки мощного пологого пласта с выпуском угля подкровельной толщи: пат. № 2745908 С2 Российская Федерация, МПК E21C 41/18, E21C 35/22, E21D 23/00 : № 2018145312 / Стародубов А. Н., Кравцов В. П., Клишин В. И.; заявл. 18.12.2018 : опубл. 02.04.2021, Бюл. № 10. 5 с. EDN OUIJPA.

24. Романченко С. Б., Руденко Ю. Ф., Костеренко В. Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. Москва : Изд-во «Горное дело», 2011. 256 с.

25. Коршунов Г. И., Мазаник Е. В., Ерзин А. Х., Корнев А. В. Эффективность применения поверхностно-активных веществ для борьбы с угольной пылью // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 3. С. 55–61. EDN: SXEZIL.

26. Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Филатов А. М. Управление поверх-

ностно-адгезионным барьером при пылеподавлении на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11–2. С. 114–125. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_114. EDN KCRPOS.

27. ГОСТ Р 55733—2013. Освещение подземных горных выработок. М. : Стандартинформ, 2019. 8 с.

28. Черкасов П. В., Попинако Я. В., Никитенко М. С. Анализ влияния освещенности на качество распознавания лазерной сетки машинным зрением // Горная промышленность. 2024. № S5. С. 110–115. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-110-115. EDN: BGREOE.

29. Попинако Я. В., Никитенко М. С., Худоногов Д. Ю. [и др.] Экспериментальные исследования зависимости влияния освещенности на качество распознавания лазерной линии машинным зрением // Уголь. 2024. № 11S. С. 171–179. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-171-179.

© 2026 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Черкасов Павел Вадимович**, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18), e-mail: [cherkasov.pavel.v@gmail.com](mailto:cherkasov.pavel.v@gmail.com);

**Худоногов Данила Юрьевич**, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18).

**Кизилев Сергей Александрович**, научный сотрудник, кандидат технических наук, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18);

**Никитенко Михаил Сергеевич**, заведующий лабораторией, кандидат технических наук, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18).

Заявленный вклад авторов:

Черкасов Павел Вадимович, Худоногов Данила Юрьевич, Кизилев Сергей Александрович, Никитенко Михаил Сергеевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-77-84

**Pavel V. Cherkasov\***, **Danila Yu. Khudonogov**, **Sergey A. Kizilov**, **Mikhail S. Nikitenko**

Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Science

\* for correspondence: [cherkasov.pavel.v@gmail.com](mailto:cherkasov.pavel.v@gmail.com)

## ASSESSING THE IMPACT OF AIRBORNE DUST AND HUMIDITY IN MINE WORKINGS ON MACHINE VISION SYSTEM EFFICIENCY



Article info

### Abstract.

The implementation of machine vision technology into automated control systems for mining equipment in coal mines faces the challenge of ensuring its operational reliability under the specific conditions of underground mine workings. A key limitation is degraded visibility, primarily influenced

Received:  
15 January 2026

Accepted for publication:  
15 March 2026

Accepted:  
15 April 2026

Published:  
04 June 2026

**Keywords:** machine vision, coal mine, airborne dust, humidity, efficiency, light marker, recognition

by such regulated mine atmosphere parameters as airborne dust concentration, humidity, and illumination levels. This research aims to analyze the impact of these parameters on the quality of light marker recognition by a machine vision system. The article provides a brief analysis of dust generation sources, including its dispersity and concentrations in the workings, as well as humidity conditions created by dust suppression systems. Requirements for lighting systems to ensure the stable operation of digital video camera optics are presented. The experimental work was conducted on a laboratory-scale mock-up of an isolated section, simulating mine atmosphere conditions for dust and humidity. The experiments investigated the correlation between the light marker recognition coefficient and the concentration of suspended particulate matter at high relative humidity. The results demonstrate that within normative limits for dust and humidity, the quality of marker projection recognition using machine vision technology remains high. Consequently, it is established that the primary destabilizing factors for machine vision in underground environments are elevated concentrations of dust and moisture. The obtained results have enabled the definition of boundary conditions for applying machine vision-based optical systems, provided a foundation for developing adaptive image processing algorithms, and confirmed the feasibility of effectively deploying light marker-based machine vision technology under simulated conditions.

**For citation:** Cherkasov P.V., Khudonogov D.Yu., Kizilov S.A., Nikitenko M.S. Assessing the impact of airborne dust and humidity in mine workings on machine vision system efficiency. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2026; 2(184):77-84 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-77-84, EDN: WPRIKO

#### REFERENCES

1. Du Y., Zhang H., Liang L., Zhang J., Song B. Applications of Machine Vision in Coal Mine Fully Mechanized Tunneling Faces: A Review. *IEEE Access*. 2023; 11:102871–102898. (In Eng.) DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3317048.
2. 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. (In Eng.) DOI: 10.1007/s10462-020-09841-6. EDN DEZQGD.
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. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.003. EDN VYPLPV.
4. Huang M.Q., Ninic 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. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677. EDN MVKAZC.
5. Lei W., Liu J. Early fire detection in coalmine based on video processing. *Proc. Int. Conf. Commun., Electron. Autom. Eng. Berlin*. Germany: Springer; 2012. Pp. 239–245. (In Eng.)
6. Yang R., Qiao T., Pang Y., Yang Y., Zhang H., Yan G. Infrared spectrum analysis method for detection and early warning of longitudinal tear of mine conveyor belt. *Measurement*. 2020; 165:107856. (In Eng.)
7. Vlasov S.Yu., Kipov M.Kh. Machine vision in poor visibility conditions. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023; 5(115):25–31. (In Russ.) DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-25-31. EDN FIBFIC.
8. Cao P., Wang X., Li L., Liu M., Wang M. An improved and advanced method for dehazing coal mine dust images. *Scientific Reports*. 2025; 15:11235. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41598-025-95912-z.
9. Santa N., Keles C., Saylor J. R., Sarver E. Demonstration of Optical Microscopy and Image Processing to Classify Respirable Coal Mine Dust Particles. *Minerals*. 2021; 11(8):838. (In Eng.) DOI: 10.3390/min11080838.
10. Liu Y., Ma H. Remote on-line detection system for coal dust particle based on machine vision technology. *J. Liaoning Tech. Univ. (Nat. Sci.)*. 2012; 31:822–825. (In Eng.)
11. GOST R 58196–2018. Mining. Dust Control at Coal Mining Enterprises. Terms and Definitions. M.: Standartinform; 2018. 16 p. (In Russ.)
12. Kabanov E.I., Kornev A.V., Korshunov G.I. Mining Safety and Mine Rescue. Guidelines for Independent Study. Saint Petersburg Mining University. 2021. 35 p. (In Russ.)
13. Chemezov E.N. Safety of underground mining operations: a study guide. Yakutsk: Publishing and Printing Complex of SVFU; 2010. 359 p. (In Russ.)
14. GOST R 55175–2012. Mine atmosphere. Dust control methods. M.: Standartinform; 2014. 21 p. (In Russ.)
15. Melnik V.V., Ermakov A.Yu., Vanyakin O.V., Borodkin P.S. Dust factor when mining thick seams with the release of under-roof coal. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2024; 2:175–184. (In Russ.) EDN PGRWNF.
16. Ning S., Zhizeng H. Application of Longwall Top Coal Caving in Challenging Geological Condi-

tions. *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical and Material Engineering (MCM 2015)*. 2015; 21:354. (In Eng.)

17. Trubitsyna D.A., Podobrazhin S.N. Smart systems for continuous automatic control of dust deposits in the network of coal mines. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2021; 3:6–17. (In Russ.) EDN XWVJZB.

18. Bulgakov Yu.F., Ovcharenko V.L. Dust hazard of coal production. Donetsk: Digital Printing House LLC; 2017. 234 p. (In Russ.)

19. Kudryashov V.V., Kubrin S.S., Kosterenko V.N., Tereshkin A.I. Problems of dust control in coal mines. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 1:89–98. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-89-98. EDN LPLOVV.

20. Prikaz Rostekhnadzora ot 08.12.2020 N 506 (red. ot 08.06.2022) "Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Instruktsiya po aerologicheskoy bezopasnosti ugol'nykh shakht". (In Russ.)

21. Starodubov A.N., Kravtsov V.P., Zinoviev V.V. Dust formation problems and measures to ensure labour protection and ecological safety in development of coal deposits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018; 4(128):99–105. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-99-104. EDN VRFYVO.

22. Prikaz Rostekhnadzora ot 11.12.2013 № 599 "Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Pravila bezopasnosti pri provedenii gornykh rabot i pererabotke tvordykh poleznykh iskopyemykh". (In Russ.)

23. Method for developing a thick, flat seam with the release of coal from the subroof layer: patent No.

2745908 C2 Russian Federation, IPC E21C 41/18, E21C 35/22, E21D 23/00: No. 2018145312 / Starodubov A.N., Kravtsov V.P., Klishin V.I.; declared 18.12.2018; published 02.04.2021, Bulletin No. 10. 5 p. (In Russ.) EDN OUJPPA.

24. Romanchenko S.B., Rudenko Yu.F., Kosterenko V.N. Dust dynamics in coal mines. Moscow: Mining Publishing House; 2011. 256 p. (In Russ.)

25. Korshunov G.I., Mazanik E.V., Erzin A.Kh., Kornev A.V. Efficiency of surfactants using for coal dust prevention. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 3:55–61. (In Russ.) EDN SXEZIL.

26. Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V., Filatov A.M. Surface adhesion barrier management in dust suppression at mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 11–2:114–125. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_2\_114\_125. EDN KCRPOS.

27. GOST R 55733–2013. Lighting of underground mine workings. M.: Standartinform; 2019. 8 p. (In Russ.)

28. 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.) DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-110-115. EDN BGREOE.

29. Popinako Ya.V., Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu., Cherkasov P.V., Kizilov S.A. Experimental researches of illumination dependence on qualitative light line shape detection with machine vision. *Ugol*. 2024; (11S):171–179. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-171-179.

© 2026 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

**Pavel V. Cherkasov**, Junior scientific fellow, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky av., 18), e-mail: [cherkasov.pavel.v@gmail.com](mailto:cherkasov.pavel.v@gmail.com)

**Danila Yu. Khudonogov**, Scientific fellow, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky av., 18);

**Sergey A. Kizilov**, Scientific fellow, Cand. Tech. Sci., FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky av., 18);

**Mikhail S. Nikitenko**, Head of laboratory, Cand. Tech. Sci., FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky av., 18).

Contribution of the authors:

Pavel V. Cherkasov, Danila Yu. Khudonogov, Sergey A. Kizilov, Mikhail S. Nikitenko – setting the research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature.

Authors have read and approved the final manuscript.

