

УДК 621.313.333.2

## ПЕРЕДОВЫЕ ПРАКТИКИ БОРЬБЫ С ДОРОЖНОЙ ПЫЛЬЮ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

**Косякова Инна Алексеевна,**

магистрант, Забайкальский государственный университет

Россия, г. Чита

inna.kosyakova.91@mail.ru

### Аннотация

Целью исследования статьи является обзор ведущих практик передовые практики борьбы с дорожной пылью в угольных шахтах. Представлен обзор наиболее эффективных технологий пылеподавления на подъездных путях угольных карьеров. Также данное исследование предлагает эффективное и экологически устойчивое решение для пылеподавления на подъездных путях угольных карьеров. Описана технология экологически безопасного пылеподавателя на основе мелассы, обладающий смачиваемостью, водоудерживающими и консолидирующими свойствами для тяжелой дорожной пыли в угольных карьерах на открытых шахтах. На основе анализа физических и химических свойств дорожной пыли, а также водоудерживающего, противоиспарительного и пылеудерживающего действия материалов-подавателей были выяснены эксплуатационные характеристики и механизм пылеподавления. Пылеподаватель образует плотную, гладкую поверхность с прочно связанными частицами. После испарения воды он затвердевает в порах, создавая прочную связь с частицами пыли и обеспечивая устойчивость к внешним воздействиям. Увеличение содержания характерных элементов подтверждает переход пылеподавателя из жидкого состояния в твердое, что позволяет эффективно консолидировать частицы пыли и снижать вторичные выбросы пыли на дорогах. Ожидается, что результаты исследования внесут значительный вклад в защиту окружающей среды открытых угольных шахт, способствуя переходу России к экологически устойчивым и высокоэффективным методам добычи полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** дорожная пыль, технологии пылеподавления, открытые угольные шахты, водоудержание, уплотнение

## BEST PRACTICES FOR ROAD DUST CONTROL IN COAL MINES

**Inna A. Kosyakova,**

master's student, Transbaikal State University

Russia, Chita

inna.kosyakova.91@mail.ru

ABSTRACT

The purpose of the research article is to review the leading practices of best practices for road dust control in coal mines. An overview of the most effective technologies for dust suppression on coal pit access roads is presented. Also, this study proposes an effective and environmentally sustainable solution for dust suppression on coal pit access roads. The technology of environmentally friendly molasses-based dust suppressant with wettability, water-holding and consolidating properties for heavy road dust in open-pit coal mines is described. Based on the analysis of the physical and chemical properties of road dust, as well as the water-holding, anti-evaporation and dust-holding effects of suppressant materials, the performance characteristics and mechanism of dust suppression were clarified. The dust suppressant forms a dense, smooth surface with tightly bound particles. After the water evaporates, it hardens in the pores, creating a strong bond with dust particles and providing resistance to external influences. The increase in the content of characteristic elements confirms the transition of the dust suppressor from a liquid to a solid state, which allows for effective consolidation of dust particles and reduction of secondary dust emissions on roads. The results of the study are expected to make a significant contribution to the protection of the environment of open coal mines, promoting Russia's transition to environmentally sustainable and highly efficient mining methods.

---

**Keywords:** road dust, dust suppression technologies, open coal mines, water retention, compaction.

---

Открытая добыча угля является важнейшей составляющей угольной промышленности России, однако она оказывает существенное влияние на экологическую обстановку на предприятиях и угольных шахтах [1,2]. Данные негативные воздействия включают в себя раскопку и снятие земельных масс, уничтожение растительности, загрязнение воздуха и многое другое [3,4]. В эксплуатационной сфере открытых горных работ образование пыли является широко распространенной проблемой, возникающей в результате таких видов деятельности, как бурение, взрывные работы, погрузка, транспортировка и разгрузка [5]. Такие работы не только загрязняют окружающую среду в районе добычи, но и создает серьезные риски для здоровья и безопасности рабочих [6,7]. Примечательно, что дорожная пыль, особенно на подъездных дорогах, по которым ездят тяжелые грузовики, составляет наибольшую долю, на нее приходится примерно 60~90% от общего количества пыли в угольных разрезах [8]. Работники угольных забоев могут подвергаться воздействию вредной респираторной пыли из различных источников, включая входное отверстие для забора пыли, входное отверстие для конвейера, разгрузочные узлы и элементы, дробилки и пр. Крайне важно снизить концентрацию респираторной пыли в зоне забоя в выработках, которые вносят значительный вклад в пылевое воздействие на рабочих очистных забоях [9]. Исследования показывают, что с годами средний расход воздуха в забоях стал выше, чем когда-либо, и более высокая скорость воздуха во входных отверстиях может привести к увеличению пылеуноса при отсутствии надлежащего контроля. Действия, вызывающие поднятие сухой пыли на приемных штреках, могут способствовать попаданию пыли в лаву. В настоящее время многие исследования сосредоточены на создании передовых методов борьбы с пылью в очистных забоях угля на конкретных участках, генерирующих пыль. Весьма важным направлением в данной сфере являются передовые практики борьбы с дорожной пылью в угольных шахтах на внутришахтных или внешних производственных путях и дорогах. Следовательно, предотвращение и контроль пыли на таких подъездных путях являются важнейшими компонентами борьбы с пылью и профессиональными заболеваниями на угольных разрезах.

Целью исследования статьи является обзор ведущих борьбы с дорожной пылью в угольных шахтах.

Особенностью современного этапа развития горных работ на угольных карьерах и шахтах является интенсификация всех технологических процессов, связанных с добычей и переработкой угольного сырья [9]. Отмеченное сопровождается усложнением процесса проветривания выработанного пространства карьера, ухудшением условий труда по пылевому и газовому факторам, негативным воздействием на организм человека и на окружающую среду. Практически каждый из этапов угледобычи связан с большим количеством образования пылевидных углематериалов различной степени дисперсности, которые значительно ухудшают условия труда и экологическую обстановку на угольных шахтах. Именно поэтому активно внедряются различные технологии пылеподавления и пылеулавливания [10]. Так, в технологических процессах угледобычи на транспортирующих комбайнах используется вентиляция забоя, орошение барабана, техническое обслуживание долота режущего барабана, также используется направленное орошение, поддержание рычага разделителя головки комбайна параллельно верхней части комбайна, дефлекторы комбайна, серповидные элементы орошения, коллектор орошения дробилки и боковые элементы орошения заднего борта. Используемые на данном этапе системы орошения изменяют свойства угольной пыли, притягивая и захватывая высокоскоростную гидрофобную ее часть, такую как уголь и кремний.

Не менее активно внедряются практики пылеулавливания и пылеподавления на ленточных транспортировочных элементах с использованием смачивания угольного сырья во время транспортировки, очистка ленты во время транспортировки, очистка ленты соскребанием и промывкой, использование вращающейся щётки для очистки транспортирующей стороны ленты и смачивание сухих лент.

В узлах перегрузки и дробилках применяется технология полной герметизация перегружателя/дробилки, сопровождаемая увлажнением угля в зоне дробления и перегружателя, также используют скрубберные технологии в зоне перегружателя/дробилки и использование скруббера высокого давления с гидроприводом. Для оптимизации процесса угледобычи с точки зрения пылеподавления при дроблении материалов добавляют воду, обеспечивая связывание мельчайших частиц пыли, которые в противном случае отскакивали бы от распыления воды.

Подъездные пути на открытых угледобывающих разрезах преимущественно состоят из грунтовых дорог, рыхлого грунта и скальных пород, источником которых являются лёсс и пустая порода, образующиеся в процессе добывающих работ на шахтных предприятиях [11]. Большой тоннаж и высокая плотность движения карьерных самосвалов усугубляют пылеобразование из-за качения, трения, сдвига и царапания колесами грунта [12]. В настоящее время основным методом пылеподавления на этих дорогах является распыление воды. Для оптимизации процесса угледобычи с точки зрения пылеподавления в элементах впускных штреков в рамках ограничения работ по креплению во время производственных смен, применяют воду, гигроскопичные составы и поверхностно-активные вещества. Используется технология GRT Haul-Loc со специально разработанным жидким полимером, добавляемый в поливочные машины на шахтных предприятиях. Помимо связывания сдуваемых частиц пыли, GRT Haul-Loc снижает расход воды для пылеподавления на внутрипроизводственных дорогах.

Важно отметить, что более 80% открытых угольных шахт России расположены в засушливых и полузасушливых регионах [1], характеризующихся годовым количеством осадков менее 400 мм, более 3000 часов солнечного света и высокой скоростью испарения. Эти условия серьёзно ограничивают эффективность и продолжительность водного пылеподавления, особенно в сухие и жаркие летние месяцы, когда влага быстро испаряется,

сокращая эффективное время пылеподавления до менее получаса. Кроме того, дефицит водных ресурсов ещё больше снижает эффективность водяного орошения [13].

Поэтому основное внимание в исследованиях пылеподавления на открытых угольных шахтах уделяется улучшению противоиспарительных свойств пылеподавляющих материалов, эффективному связыванию и отверждению дорожной пыли, а также повышению устойчивости к повреждениям, наносимым карьерными самосвалами.

Разработка эффективных технологий пылеподавления на подъездных путях открытых угольных шахт учитывает особенности работы внедорожных самосвалов, используемых в открытых горных работах, которые вносят наибольший вклад в общий объем выбросов пыли на открытых угольных шахтах. Методы обработки грунтовых дорог на открытых угольных шахтах гигроскопичными солями, поверхностно-активными веществами, грунтовыми цементами и полимерами может использоваться для борьбы с пылью на подъездных путях. При этом контролируется увеличенное расстояние между транспортными средствами, движущимися по подъездным путям, для рассеивания и разбавления дорожной пыли, что позволяет использовать административные и плановые меры для снижения негативного воздействия рабочей пыли на персонал.

Современные эффективные методы снижения пылеобразования на дорогах открытых угольных шахт включают использование пылеподавителей и строительство новых дорог [14,15]. Хотя строительство дорог с более высокой прочностью и большей несущей способностью теоретически возможно для предотвращения пылеобразования, исследования в этой области все еще находятся в зачаточном состоянии. Химические пылеподаватели, которые показали значительно более высокую эффективность подавления пыли в лабораторных условиях по сравнению с распылением воды, в настоящее время доминируют в отношении пылеподавителей, создающих смачивающую корку. Эти пылеподаватели эффективно противостоят ветровым факторам открытых угольных шахт.

Технологии химического пылеподавления также широко применяются в условиях дорог открытых угольных шахт. Для пылеподавления на открытых угольных шахтах в условиях отсутствия сильного ветрового воздействия были разработаны составы композитных пылеподавителей на основе гуминовой кислоты с 24-часовым водоудержанием для борьбы с пылью при хранении и транспортировке угля на открытых карьерах [16]. Был создан сетчатый пылеподаватель из полиакрилата натрия, карбоната натрия и полиэтиленгликоля, который поддерживал влажность 4–5 % в течение 10 дней при условиях окружающей среды [17].

Активно ведется разработка экологически чистых пылеподавляющих средств с использованием сырья, такого как растения, микроорганизмы, бытовые отходы и отходы производства, является бурно развивающейся областью исследований [18]. Разработали экологически чистую композитную пену для подавления пыли путем модификации изолятов соевого белка молекулами желатина, которая образует твердую оболочку на поверхностях угольной пыли [19]. Создали пылеподавляющее средство на основе крахмала с низкой вязкостью для высококонцентрированного пылевого загрязнения в угольных шахтах [20]. Разработали экологически безопасный микробный пылеподаватель для борьбы с пылью на возмущенных участках взрывных отвалов [14]. Разработали пылеподаватель на основе эмульсии растительного масла пленочного типа для улучшения влагоудержания дорожной пыли [20]. Хотя эти пылеподаватели продемонстрировали хорошие лабораторные результаты, их эффективность в производственных условиях открытых угольных шахт при сильных ветровых возмущениях, вызванных движением карьерных самосвалов, остается в значительной степени неизученной.

Весьма перспективной химической технологией пылеподавления на дорогах открытых угольных шахт является метод с использованием мелассы, как побочного

продукта переработки сахарного тростника и сахарной свеклы, который представляет собой полужидкую, вязкую жидкость, содержащую сахарозу, редуцирующие сахара, белки, коллоиды и минералы, при этом содержание сахара составляет около 50% ее массы. Ее превосходные вязкостные и водоудерживающие свойства обусловлены водородными связями между сахарными фрагментами. Исследования [21] показали, что меласса может усиливать противоиспарительные свойства влажной угольной пыли, эффективно агрегировать частицы угольной пыли и повышать устойчивость к ветровой эрозии. Разработали пенный пылеподавитель на основе мелассы, который поддерживал степень связывания пыли более 98% при скорости ветра 21 м/с [22]. Кроме того, [23] исследовали сочетание мелассы с микробными пылеподавителями для обработки почвенной пыли. Несмотря на эти многообещающие результаты, применение мелассы в суровых условиях тяжелых грузовых дорог и высоких температур в угольных карьерах остается недостаточно изученным.

Именно поэтому весьма перспективной является разработка, представленная в работе [24], где для решения проблемы быстрого испарения воды во время пылеподавления на дорогах с большой нагрузкой в открытых угольных разрезах в данном исследовании были изучены физико-химические свойства дорожной пыли и разработан пылеподавитель на основе мелассы с улучшенными водоудерживающими, противоиспарительными и консолидирующими свойствами. Анализ показал, что дорожная пыль содержит большое количество разнотипных гидрофильных компонентов, что указывает на значительный потенциал пылевого загрязнения. Присутствие гидрофильных компонентов, подтвержденное кристаллической структурой и функциональными группами, подтверждается малым начальным углом смачивания пыли и коротким временем осаждения. Однако низкое содержание влаги (1,24 %) указывает на плохое водоудерживание. Для решения этой проблемы в качестве основного компонента пылеподавителя была выбрана меласса, промышленный побочный продукт с превосходными водоудерживающими и консолидирующими свойствами. Эксперименты показали, что 30% раствор мелассы в сочетании с додецилбензолсульфонатом натрия обеспечивает оптимальный синергизм. Добавление 2% глицерина улучшило увлажняющие свойства, а 2% CaCl<sub>2</sub> обеспечило максимальное влагопоглощение. Оптимизированный подавитель достиг скорости испарения 2,71 г/ч, усилия сопротивления разрушению 136,69 Н и глубины проникновения 8,27 см. Микроскопический анализ показал, что уплотненный слой пыли представлял собой гладкий, плотный слой с прочно связанными частицами пыли. В жидком состоянии пылеподавитель на основе мелассы смачивает и подавляет пыль, а при испарении воды он затвердевает, образуя связный слой, обеспечивая длительное пылеподавление.

Хотя лабораторные испытания дали ценную информацию, реальные проблемы, такие как изменчивые погодные условия, работа большегрузных автомобилей и длительный срок службы, остаются без внимания. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на полевых испытаниях, оптимизации рецептуры для повышения долговечности и экономической эффективности, а также на оценке долгосрочного воздействия на окружающую среду и стабильности подавителя в различных условиях для обеспечения устойчивого применения в угольных карьерах.

Выводы. В статье рассмотрены наиболее перспективные технологии борьбы с дорожной пылью в угольных шахтах. Показано, что для решения проблемы пылевого загрязнения на дорогах с большой нагрузкой в открытых угольных шахтах используются целый ряд технологических практик физического и химического характера. Отмечено, что при внедрении эффективных методов пылеподавления на открытых угольных шахтах важно учитывать физико-химические свойства дорожной пыли и исходя из них подбирать

оптимальный метод пылеподавления. Исходя из того, что дорожная пыль на открытых угольных шахтах в основном состоит из неорганических минералов с оксидами кремния и гидроксильными группами, что указывает на ее гидрофильные свойства, важно использовать пылеподавляющую технологию, обеспечивающую смачивающий, водоудерживающий и связующий характер.

Данное исследование предлагает эффективное и экологически устойчивое решение для пылеподавления на подъездных путях угольных карьеров. Фактически данная разработка позволяет получить экологически безопасный пылеподаватель на основе мелассы, обладающий смачиваемостью, водоудерживающими и консолидирующими свойствами для тяжелой дорожной пыли в угольных карьерах на открытых шахтах. На основе анализа физических и химических свойств дорожной пыли, а также водоудерживающего, противоиспарительного и пылеудерживающего действия материалов-подавателей были выяснены эксплуатационные характеристики и механизм пылеподавления. Ожидается, что результаты исследования внесут значительный вклад в защиту окружающей среды открытых угольных шахт, способствуя переходу России к экологически устойчивым и высокоэффективным методам добычи полезных ископаемых.

#### Список литературы:

1. Кудряшов В. В., Кубрин С. С., Костеренко В. Н., Терешкин А. И. Проблемы пылевого контроля в угольных шахтах // ГИАБ. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-pylevogo-kontrolya-v-ugolnyh-shahtah> (дата обращения: 14.09.2025).
2. Писарев В.С., Басаргин А.А. Методы борьбы с пылью на карьерных дорогах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-borby-s-pylyu-na-kariernyh-dorogah> (дата обращения: 14.09.2025).
3. Kung H.C., Lin W.C., Huang B.W., Mutuku J.K., Chang-Chien G.P. Techniques for suppressing mineral dust aerosol from raw material stockpiles and open pit mines: a review. *Aerosol Air Qual. Res.*, 24 (2024), Article 230166.
4. Liu B., Liu X.H., Wan H.W., Ma Y., Lu L.H. Long-term quantitative analysis of the temperature vegetation dryness index to assess mining impacts on surface soil moisture: a case study of an open-pit mine in arid and semiarid China. *Appl. Sci.*, 15 (2025), p. 1850.
5. Kamran M., Jiskani I.M., Wang Z.M., Zhou W. Decision intelligence-driven predictive modelling of air quality index in surface mining. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 133 (2024), Article 108399.
6. Feng S.M., Zhang J. Quantitative inversion of integrated hyperspectral and optical remote sensing images to monitor dust distribution in open pit mines. *All Earth*, 37 (2025), pp. 1-13.
7. Wang M., Yang Z.W., Tai C.W., Zhang F., Zhang Q.F., Shen K.J., Guo C.B. Prediction of road dust concentration in open-pit coal mines based on multivariate mixed model. *PLoS One*, 18 (2023), Article 0284815.
8. Шаров Н.А., Дудаев Р.Р., Крищук Д.И., Лискова М.Ю. Методы пылеподавления на угольных разрезах Крайнего Севера // Недропользование. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-pylepodavleniya-na-ugolnyh-razrezah-kraynego-severa> (дата обращения: 14.09.2025).

9. Кондрашева Н.К., Киреева Е.В., Зырянова О.В. Разработка новых составов для борьбы с пылеобразованием в горнодобывающей и горнотранспортной промышленности // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С.
10. Dong L., Tong X., Li X. et al. Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 210, p. 1562-1578.
11. Shabaev S., Ivanov S. Selection of the optimal grain-size distribution of crushed stone sand and gravel sand mixtures for the pavement of truck haul roads of coal open pits. *Vth International Innovative Mining Symposium*, 174 (2020), Article 01036.
12. Laverdière A., Hao S.P., Pabst T., Courcelles B. Effect of gradation, compaction and water content on crushed waste rocks strength. *Road. Mater. Pavement.*, 24 (2023), pp. 761-775.
13. Chen J., Wang H.R., He Y., Liu R., Zeng C.H., Yan K.Y., Zhu J.P.P. Preparation and performance evaluation of an efficient microbial dust suppressant for dust control in disturbed areas of blast piles in open-pit coal mines. *J. Environ. Manag.*, 373 (2025), Article 123684.
14. Zhang J.S., Wang K., Jia H.F., Wang Y.A., Reb X.F., Jia Y.L., Tong L.Q. Study on the synergistic effect of surfactant composite on foam wetting and stabilization in the process of foam dust reduction. *J. Environ. Chem. Eng.*, 13 (2025), Article 115674.
15. Lu X., Tu L.X., Tian Y., Zhou W., Zhao X.J., Yang Y.Q. Experimental study of the freeze-thaw damage of alpine surface coal mine roads based on geopolymer materials. *Water*, 15 (2023), p. 3093.
16. Shen Z.Y., Ao Z.C., Wang Z.M., Yang Y.Q. Study on crust-shaped dust suppressant in non-disturbance area of open-pit coal mine - a case study. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 20 (2023), p. 934.
17. Huang Z.A., Huang Y., Yang Z.J., Zhang J., Zhang Y.H., Gao Y.K., Shao Z.L., Zhang L.H. Study on the physicochemical characteristics and dust suppression performance of new type chemical dust suppressant for copper mine pavement. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 28 (2021), pp. 59640-59651.
18. Taehee L., Christopher P.C., Bumjoon K., Minkyu K. Environmentally friendly methylcellulose blend binder for hydrophobic dust control. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 4 (2022), pp. 1512-1522.
19. Dong H., Yu H.M., Xu R.X., Cheng Y., Zhao D.L. Research on application effect and mechanism of degradable multifunctional dust suppression foam in coal mine. *J. Environ. Chem. Eng.*, 12 (2024), Article 112694.
20. Xia S.Y., Song Z.L., Zhao X.L., Gao Z., Wen Y., Li Y.N. Preparation of a vegetable-oil film-type emulsion dust suppressant and adsorption performance study on road dust surface in open-pit coal mines. *Environ. Res.*, 278 (2025), Article 121737J. *Environ. Manag.*, 373 (2025), Article 123684.
21. Liu J.G., Wang T.Y., Jin L.Z., Li G., Wang S., Wei Y.X., Ou S.N., Wang Y.P., Xu J.G., Lin M.L., Wang J.H., Liu X.F. Suppression characteristics and mechanism of molasses solution on coal dust: a low cost and environment friendly suppression method in coal mines. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 19 (2022), Article 16472.

22. Zhou G., Zhao M.R., Yao J.J., Dao V.D., Li, S.L. Wang H.T., Li J.H., Liu B. Environmental application of molasses-based foam dust suppressant: preparation, performance evaluation and mechanism analysis. *Constr. Build. Mater.*, 458 (2025), Article 139541.
23. Wang J.Q., Hu X.M., Zhao Y.Y., Li X., Zhao P.D., Guo Y.X. Effects of molasses-based microbial dust suppressant on soil dust and microbial community. *Powder. Tech*, 441 (2024), Article 119831.
24. Yan J., Yang F., Zhang W., Li P., Zhou W., Lu X., Li K. Characterization of road dust and formulation of a molasses-based dust suppressant for heavy-duty haul roads in open-pit coal mine. *Atmospheric Pollution Research*, p. 102589, May 2025.

### References:

1. Kudryashov V. V., Kubrin S. S., Kosterenko V. N., Tereshkin A. I. Dust Control Issues in Coal Mines // *GIAB*. 2020. No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-pylevogo-kontrolya-v-ugolnyh-shahtah> (accessed: 14.09.2025).
2. Pisarev V. S., Basargin A. A. Dust Control Methods on Quarry Roads // *Inter Expo Geo-Siberia*. 2020. No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-borby-s-pylyu-nakariernyh-dorogah> (accessed: 14.09.2025).
3. Kung H.C., Lin W.C., Huang B.W., Mutuku J.K., Chang-Chien G.P. Techniques for suppressing mineral dust aerosol from raw material stockpiles and open pit mines: a review. *Aerosol Air Qual. Res.*, 24 (2024), Article 230166.
4. Liu B., Liu X.H., Wan H.W., Ma Y., Lu L.H. Long-term quantitative analysis of the temperature vegetation dryness index to assess mining impacts on surface soil moisture: a case study of an open-pit mine in arid and semiarid China. *Appl. Sci.*, 15 (2025), p. 1850.
5. Kamran M., Jiskani I.M., Wang Z.M., Zhou W. Decision intelligence-driven predictive modeling of air quality index in surface mining. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 133 (2024), Article 108399.
6. Feng S.M., Zhang J. Quantitative inversion of integrated hyperspectral and optical remote sensing images to monitor dust distribution in open pit mines. *All Earth*, 37 (2025), pp. 1–13.
7. Wang M., Yang Z.W., Tai C.W., Zhang F., Zhang Q.F., Shen K.J., Guo C.B. Prediction of road dust concentration in open-pit coal mines based on a multivariate mixed model. *PLoS One*, 18 (2023), Article 0284815.
8. Sharov N.A., Dudayev R.R., Krishchuk D.I., Liskova M.Yu. Dust suppression methods in open-pit coal mines of the Far North // *Nedropolzovanie*. 2019. No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-pylepodavleniya-na-ugolnyh-razrezah-kraynego-severa> (date of access: 14.09.2025).
9. Kondrasheva N.K., Kireeva E.V., Zyryanova O.V. Development of new compositions for combating dust formation in the mining and mining transport industry // *Zapiski Gornogo Instituta*. 2021. Vol. 248. P.
10. Dong L., Tong X., Li X. et al. Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 210, pp. 1562-1578.

11. Shabaev S., Ivanov S. Selection of the optimal grain-size distribution of crushed stone sand and gravel sand mixtures for the pavement of truck haul roads of coal open pits. *Vth International Innovative Mining Symposium*, 174 (2020), Article 01036.
12. Laverdière A., Hao S.P., Pabst T., Courcelles B. Effect of gradation, compaction and water content on crushed waste rocks strength. *Road. Mater. Pavement.*, 24 (2023), pp. 761-775.
13. Chen J., Wang H.R., He Y., Liu R., Zeng C.H., Yan K.Y., Zhu J.P.P. Preparation and performance evaluation of an efficient microbial dust suppressant for dust control in disturbed areas of blast piles in open-pit coal mines. *J. Environ. Manag.*, 373 (2025), Article 123684.
14. Zhang J.S., Wang K., Jia H.F., Wang Y.A., Reb X.F., Jia Y.L., Tong L.Q. Study on the synergistic effect of surfactant composite on foam wetting and stabilization in the process of foam dust reduction. *J. Environ. Chem. Eng.*, 13 (2025), Article 115674.
15. Lu X., Tu L.X., Tian Y., Zhou W., Zhao X.J., Yang Y.Q. Experimental study of the freeze-thaw damage of alpine surface coal mine roads based on geopolymer materials. *Water*, 15 (2023), p. 3093.
16. Shen Z.Y., Ao Z.C., Wang Z.M., Yang Y.Q. Study on crust-shaped dust suppressant in non-disturbance area of open-pit coal mine - a case study. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 20 (2023), p. 934.
17. Huang Z.A., Huang Y., Yang Z.J., Zhang J., Zhang Y.H., Gao Y.K., Shao Z.L., Zhang L.H. Study on the physicochemical characteristics and dust suppression performance of new type chemical dust suppressant for copper mine pavement. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 28 (2021), pp. 59640-59651.
18. Taehee L., Christopher P.C., Bumjoon K., Minkyu K. Environmentally friendly methylcellulose blend binder for hydrophobic dust control. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 4 (2022), pp. 1512-1522.
19. Dong H., Yu H.M., Xu R.X., Cheng Y., Zhao D.L. Research on application effect and mechanism of degradable multifunctional dust suppression foam in coal mine. *J. Environ. Chem. Eng.*, 12 (2024), Article 112694.
20. Xia S.Y., Song Z.L., Zhao X.L., Gao Z., Wen Y., Li Y.N. Preparation of a vegetable-oil film-type emulsion dust suppressant and adsorption performance study on road dust surface in open-pit coal mines. *Environ. Res.*, 278 (2025), Article 121737J. *Environ. Manag.*, 373 (2025), Article 123684.
21. Liu J.G., Wang T.Y., Jin L.Z., Li G., Wang S., Wei Y.X., Ou S.N., Wang Y.P., Xu J.G., Lin M.L., Wang J.H., Liu X.F. Suppression characteristics and mechanism of molasses solution on coal dust: a low cost and environment friendly suppression method in coal mines. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 19 (2022), Article 16472.
22. Zhou G., Zhao M.R., Yao J.J., Dao V.D., Li, S.L. Wang H.T., Li J.H., Liu B. Environmental application of molasses-based foam dust suppressant: preparation, performance evaluation and mechanism analysis. *Constr. Build. Mater.*, 458 (2025), Article 139541.
23. Wang J.Q., Hu X.M., Zhao Y.Y., Li X., Zhao P.D., Guo Y.X. Effects of molasses-based microbial dust suppressant on soil dust and microbial community. *Powder. Tech*, 441 (2024), Article 119831.

24. Yan J., Yang F., Zhang W., Li P., Zhou W., Lu X., Li K. Characterization of road dust and formulation of a molasses-based dust suppressant for heavy-duty haul roads in open-pit coal mine. *Atmospheric Pollution Research*, p. 102589, May 2025.