ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12):5-16
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.274:004.383.8 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_5

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ОПАСНОСТЕЙ В ОЧИСТНЫХ КАМЕРАХ ПРИ ТОРЦЕВОМ ВЫПУСКЕ И ОТГРУЗКЕ РУДНОЙ МАССЫ ИЗ ОТКРЫТОГО ОЧИСТНОГО ПРОСТРАНСТВА

Д.Р. Каплунов[1], Д.Н. Радченко[1], Р.А. Сыровацкий[1]

[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН), Россия, Москва, e-mail: mining_expert@mail.ru

Аннотация: Современные горные предприятия с подземным способом разработки характеризуются высоким уровнем автоматизации производства и широким набором современных технических средств, работающих, в том числе, автономно. Развитие технологий очистной выемки с применением дистанционно управляемых погрузочно-доставочных машин привело к распространению на подземных рудниках камерных систем разработки с торцевым выпуском руды и последующей закладкой выработанного пространства. При этом предусмотрен заезд погрузочно-доставочных машин в очистное пространство камеры, куда человеку доступ запрещен. Несмотря на вывод оператора погрузочно-доставочных машин в безопасную зону, риск порчи и утраты дорогостоящего оборудования, ввиду обрушений горной массы различной природы, остается весьма высоким. Случаи повреждения и завалов погрузочно-доставочных машин по мере торцевого выпуска и отгрузки рудной массы достаточно часты на производстве. С учетом проведенного анализа практики работы горнодобывающих предприятий в статье систематизированы данные виды опасностей и разработаны соответствующие схемы их формирования и проявления по мере выпуска и отгрузки рудной массы. Рассмотренные опасные явления и процессы представляют реальную угрозу безопасному производству подземных горных работ. Описанные в статье схемы являются основой для выбора методов и средств оценки состояния очистного пространства с применением современных технологий, в том числе с использованием беспилотных технических средств, которые становятся исследовательским инструментом для познания природы опасных явлений и процессов в очистном пространстве, с перспективой переноса наработанных результатов в повседневную практику подземных горных работ.

Ключевые слова: камерные системы разработки, погрузочно-доставочная машина, торцевой выпуск, очистное пространство, риск обрушений, виды опасностей, пути снижения риска.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00345, https://rscf.ru/project/25-17-00345/.

Для цитирования: *Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н., Сыровацкий Р. А.* Разработка и анализ схем формирования опасностей в очистных камерах при торцевом выпуске и отгрузке рудной массы из открытого очистного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_5.

Development and analysis of hazard formation in open stoping and haulage of ore

D.R. Kaplunov[1], D.N. Radchenko[1], R.A. Syrovatskiy[1]

[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russia.

Abstract: Modern underground mines feature a high level of production automation and a wide range of advanced equipment, including self-sustained machines. Development of mining technologies with remote-control load–haul–dumpers lead to expansion of stoping systems with caving and backfill. In this case, LHD enter the stoping areas where access of people is prohibited. Although an LHD operator is situated in a safe zone, the risk of damage and loss of expensive equipment because of different-nature rock falls and collapses is very high. Events of damage and obstruction of load–haul–dumpers as stoping and haulage of rock mass advance are rather frequent in mines. Using the implemented analysis of mining practices, the article describes the systematized types of hazards and patterns of their formation and occurrence in the course of ore caving, drawing and haulage. The discussed hazardous events and processes pose an actual threat on underground mining safety. The described patterns are the framework for selecting methods and means for stope assessment using advanced technologies, including unmanned vehicles or systems which become a tool for investigating nature of hazardous events and processes in stopes, with the prospects of application of the results in routine underground mining practices.

Key words: stoping systems, load–haul–dumper, bottom drawing, stoping area, risk of rock failure, types of hazards, ways of risk reduction.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-17-00345, https://rscf.ru/project/25-17-00345/.

For citation: Kaplunov D. R., Radchenko D. N., Syrovatskiy R. A. Development and analysis of hazard formation in open stoping and haulage of ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_5.

Введение

Среди передовых технических решений, применяемых на подземных горных работах в настоящее время, — дистанционное управление горной техникой, направляемой в забой оператором погрузочно-доставочной машины (ПДМ) [1 — 4]. При этом оператор находится в безопасной от возможных обрушений зоне [5 — 8]. Кроме этого, на подземных рудниках осуществляется внедрение автономных и полуавтономных погрузочно-доставочных машин, работа которых корректируется из пунктов управления, расположенных на поверхности [9, 10]. Доступ дистанционно управляемых ПДМ в очистное пространство привел к развитию камерных систем разработки с торцевым выпуском рудной массы. Под последним понимается выпуск взорванной рудной массы из очистного пространства через торец заранее пройденной горной выработки, которая погашается по мере отработки камеры в отступающем порядке. При этом торцевая выработка является одновременно и выпускной, и погрузочной.

При добыче руд камерными системами с указанным вариантом выпуска рудной массы вывод персонала в безо-

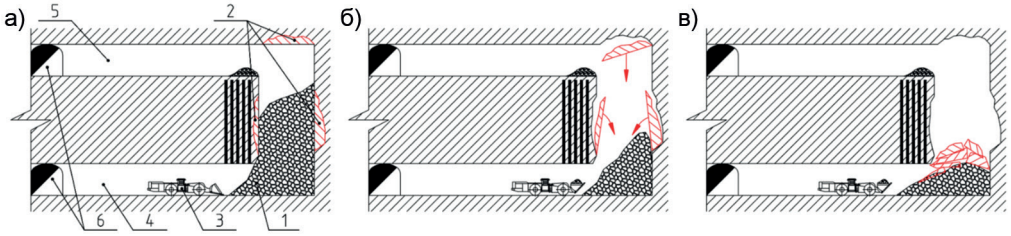
пасную зону не исключает аварий и инцидентов, связанных с внезапными обрушениями различной природы. По мере выпуска и отгрузки руды непосредственно в забое или в камере происходят непрогнозируемые завалы оборудования [11]. Для снижения риска обрушений на предприятиях проводится комплексный анализ горно-геологических характеристик массива и тензора природного поля напряжений. Для безопасного ведения работ при определении направлений проходки выработок применяется оценка трещиноватости и устойчивости массива численным и аналитическими методами [12—14]. Обеспечивается трехмерное геомеханическое моделирование с выявлением мест, склонных к вывалообразованию [15, 16]. Вместе с тем риск порчи и утраты дорогостоящего погрузочно-доставочного оборудования, ввиду обрушений горной массы различной природы, остается весьма высоким. Снижение уровня риска может быть основано на применении в очистном пространстве беспилотных технологий идентификации опасностей в динамике выпуска и отгрузки рудной массы.

Подходы, использованные при разработке схем формирования и проявления опасностей в очистных камерах при выпуске и отгрузке рудной массы

Разработка схем формирования и проявления опасностей в очистных камерах при выпуске и отгрузке рудной массы произведена на базе анализа опыта работы предприятий с подземным способом разработки, применяющих камерные системы разработки с торцевым выпуском рудной массы и последующей закладкой выработанного пространства. Оценены условия работы ПДМ в ходе очистной выемки и выделены наиболее часто проявляющиеся виды опасностей, влекущие риски для персонала, занятого в процессах очистной выемки, а также дистанционно управляемого оборудования. Проанализированы данные многолетних наблюдений, в том числе видеофиксации работы ПДМ в реальных условиях с выделением факторов риска. Изучены и использованы при обосновании схем формирования опасностей имеющиеся у авторов данные геомеханических и маркшейдерских служб подземных рудников по характерным видам опасностей, проявляющихся в динамике выпуска рудной массы из подземных очистных камер. Проведено согласование с техническими специалистами горных предприятий о фактах, частоте проявлений и масштабов инцидентов и аварий, связанных с обрушениями при работе ПДМ в открытом очистном пространстве.

Виды опасных явлений и процессов в динамике выпуска рудной массы и условия их проявления

При эксплуатации дистанционно управляемых и автономных (полуавтономных) ПДМ возникают аварии и инциденты, связанные с обрушениями в выработанное пространство очистных камер заколов, вывалов кусков горной массы по системам трещин, обрушениями мелко- и крупногабаритных кусков по контуру отбойки и многих мелких проявлений, а также обрушениями элементов крепи и закладочного массива. Основной объем отслоений происходит: с боков камеры; в ослабленном массиве по литологическим контактам; при расположении и отработке камер по простиранию рудного тела. Очевидно, что все рассмотренные негативные явления и процессы при отработке запасов подземных очистных камер, включая вывалы отдельных кусков, отслоения и



1 – отбитая рудная масса после производства взрывных работ;
2 – опасности, подлежащие идентификации; 3 – погрузочно-доставочная машина; 4 – буро-доставочный штрек (орт); 5 – вентиляционно-закладочный штрек (орт); 6 – откаточная горная выработка

Рис. 1. Схема формирования и проявления опасностей в камере (вывал разупрочненных в результате буровзрывных работ вмещающих пород): состояние очистного пространства до начала погрузки (а); в процессе выпуска рудной массы (б); после проявления опасностей (в)

Fig. 1. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (fall of wall rock weakened by drilling and blasting operations): state of the stope void before loading commences (a); during ore draw (b); after hazard manifestation (v)

обрушения различной природы, завалы оборудования, проявляются исключительно по мере выпуска и отгрузки отбитой рудной массы. Основные угрозы для ПДМ связаны с непрогнозируемым на этапе геомеханического обоснования параметров отработки выемочных единиц падением обломков горной породы. Это может привести к повреждению ПДМ (например, ударом обрушившейся породы по кузову или кабине, завалу машины обрушившейся породой и пр.), простоям и потере оборудования.

На рис. 1 приведена схема проявления опасностей в камере в динамике выпуска и отгрузки рудной массы из камеры. По мере производства работ возникает разгрузка прилегающего к выработанному пространству массива разупрочненных пород, что приводит к перераспределению напряжений на границах очистного пространства, отслоениям и раскрытию трещин. Неустойчивые участки в контуре очистного пространства подвержены вывалообразованию, что влечет риски для работающего в очистном пространстве оборудования. Задачей мониторинга состояния очистного пространства при этом является заблаговременное выявление участков массива для своевременного вывода ПДМ из очистного пространства. Наиболее перспективным здесь является применение беспилотных технических средств для мониторинга состояния очистного пространства из выработок вентиляционно-закладочного горизонта. Это будет способствовать своевременной идентификации опасностей, выводу ПДМ из камеры для ликвидации опасностей естественным или принудительным способом.

На схеме рис. 2 отражены условия торцевого выпуска и отгрузки отбитой рудной массы при наличии участка неразрушенного массива непосредственно в кровле забоя. Формирование опасности связано с зависанием достаточно больших объемов руды на таком участке. По мере выпуска рудной массы на него действуют различные силы, в том числе динамические нагрузки от перемещающейся в ходе выпуска рудной массы, а также от работающей ПДМ. Это приводит к разупрочнению и отслоению пород от вмещающего массива, вплоть до обрушения всего объема слежавшейся на нем отбитой рудной массы.

Такое обрушение может произойти, в том числе, внезапно и повлечь утрату горного оборудования и травмирование персонала. Идентификация такого вида

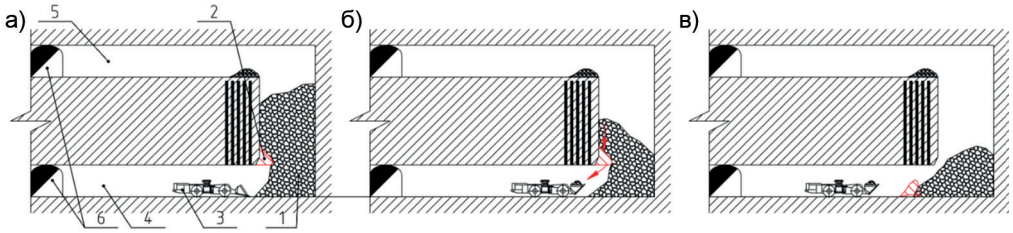


Рис. 2. Схема формирования и проявления опасностей в камере (формирование участка неразрушенного массива в кровле забоя); обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (development of an unfractured rock mass zone in the stope back). Designations same as in Fig. 1

опасности из выработок вышележащего горизонта может быть осуществлена с помощью беспилотных технических средств по характерному скоплению руды со стороны отгрузки, а также путем совместного анализа результатов идентификации опасностей с телеметрическими данными о параметрах работы ПДМ.

На рис. 3 приведена схема формирования затора в границах очистного пространства, возникшего в результате расклинивания нескольких крупногабаритных кусков руды (негабарита) по мере выпуска и отгрузки отбитой рудной массы. Расклинивание в пределах контура отрабатываемой камеры проявляется в результате сцепления кусков негабаритной крупности с вмещающими породами, ограничивающими открытое очистное пространство, а также консолидации негабаритных кусков между собой.

При таком механизме проявления опасности по мере выпуска возникает риск непрогнозируемого вывала негабарита в призабойное пространство, сопровождающееся последующим обрушением разрыхленной рудной массы.

Такое явление может сопровождаться воздушной волной, повышенной запыленностью рудничного воздуха, повреждением оборудования (в случае его работы в дистанционно-управляемом режиме). Идентификация опасности беспилотными техническими средствами возможна непосредственно с ПДМ, автономными устройствами после остановки работ в забое, а также при согласованном мониторинге непосредственно в забое и в очистном пространстве с вышележащего горизонта на предмет обнаружения неравномерных участков [17]. В последнем случае поверхность развала рудной массы в динамике выпуска над зоной предполагаемого рас-

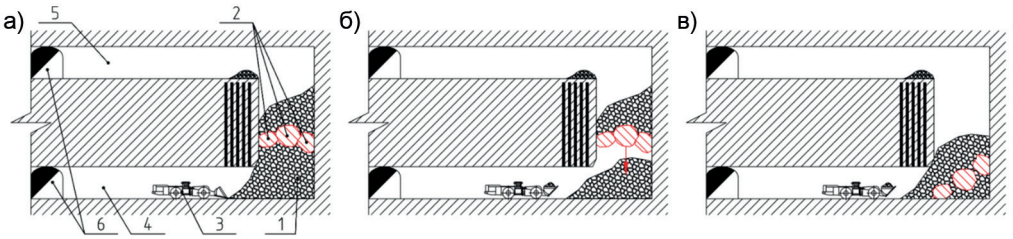


Рис. 3. Схема формирования и проявления опасностей в камере (расклинивание кусков негабаритной крупности); обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (wedging of oversize fragments). Designations same as in Fig. 1

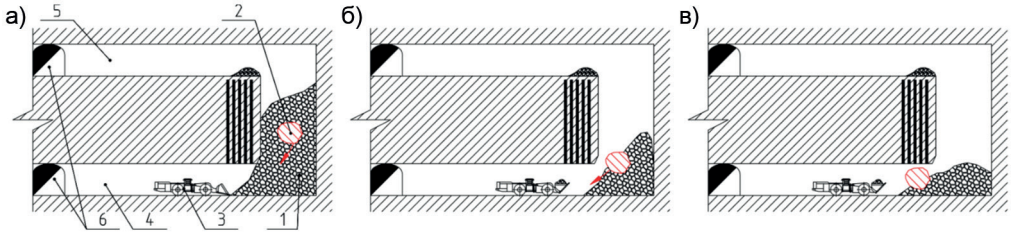


Рис. 4. Схема формирования и проявления опасностей в камере (обрушение негабарита); обозначения см. на рис. 1

Fig. 4. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (collapse of oversize fragments). Designations same as in Fig. 1

клинивания остается неподвижной, что является условием проверки и принятия мер для минимизации риска последующего обрушения рудной массы на ПДМ.

Схема на рис. 4 отражает механизм возникновения опасности, связанной с обрушением негабарита — внезапным либо наоборот — визуально определяемым и прогнозируемым сходом отдельного негабаритного куска рудной массы в зону производства отгрузочных работ.

Очевидно, что причины нахождения в отбитой рудной массе отдельных кусков негабаритной крупности различны. При невыдержанных параметрах пробуренных вееров скважин или/и рассредоточении заряда ВВ такие куски формируются непосредственно во время производства взрывных работ и теоретически могут располагаться в любой части разрыхленной рудной массы, отбиваемой за взрыв. Такие негабариты достаточно просто отслеживаются по мере выпуска, даже визуально (инструментально), из выработок вентиляционно-закладочного горизонта, ввиду нахождения, в том числе, на поверхности развала рудной массы. Достоверность идентификации опасности может быть повышена с применением беспилотных средств [18—20]. При нахождении негабарита в теле развала отбитой рудной массы, как показано на рис. 4, *а*, его обнаружение затруднено. По мере выпуска рудной массы он может проявиться непосредственно в забое, препятствуя продолжению выпуска либо отгрузки. Это требует дополнительных работ по его ликвидации. В иных случаях куски негабаритной крупности могут остаться в камере, требуя изыскания решений по их ликвидации и извлечению разрушенного материала.

На схеме рис. 5 отражено возможное возникновение угрозы для оборудова-

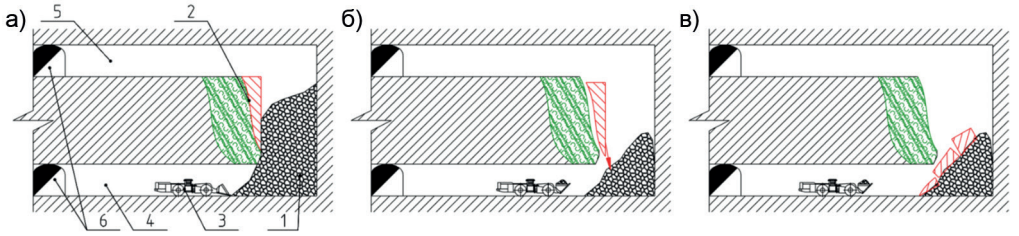


Рис. 5. Схема формирования и проявления опасностей в камере (отслоение части массива по контакту литологических разностей); обозначения см. на рис. 1

Fig. 5. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (delamination of rock mass along a lithological contact). Designations same as in Fig. 1

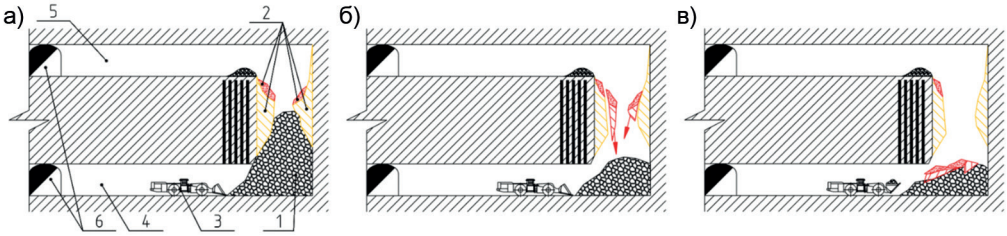


Рис. 6. Схема формирования и проявления опасностей в камере (формирование участка некачественно отбитой рудной массы); обозначения см. на рис. 1

Fig. 6. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (formation of poorly fragmented ore). Designations same as in Fig. 1

ния и изменение конфигурации очистного пространства камеры в результате отслоения части рудного массива по контакту литологических разностей. На современных горных предприятиях такие ситуации прогнозируются на этапе планирования работ по очистной выемке. Вместе с тем при отработке участков, характеризующихся интенсивно перемежающимися литологическими разностями, подобные опасные явления и процессы происходят во время отгрузки рудной массы. Применение беспилотных технологий мониторинга состояния потенциально опасных участков позволяет отслеживать развитие трещиноватости и отслоений, принимать меры по остановке работ до устранения причин и последствий опасных явлений.

На рис. 6 отражен механизм формирования участка некачественно отбитой рудной массы в ходе производства буровзрывных работ (БВР), что вызвано недоработкой взрывных скважин или низкой информативностью данных инклинометрии буровых скважин.

В результате БВР возникают недоработанные участки, которые по мере выпуска и отгрузки руды обнажаются и могут проявлять признаки неустойчивости, с постепенным отслоением кусков рудной массы в камеру, вплоть до вывалообразования [14]. На практике такие воронки могут быть исследованы с применением беспилотных технологий мониторинга состояния очистного пространства и своевременно устранены.

На схеме, приведенной на рис. 7, отражено проявление возможных отслоений при отработке камеры вблизи прилегающих закладочных массивов. Отслоения могут возникать со всех сторон камеры, в зависимости от расположения закладочного материала и его присечки к проектному контуру очистного пространства.

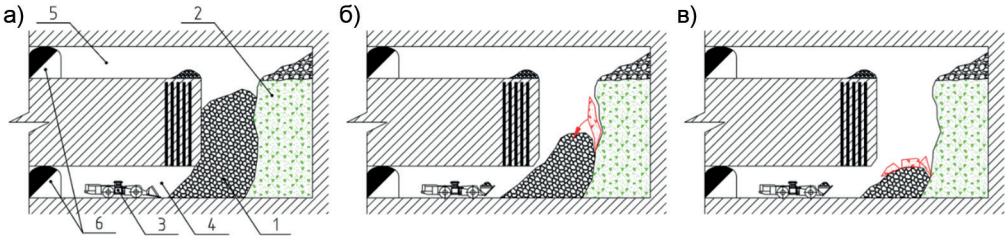


Рис. 7. Схема формирования и проявления опасностей в камере (обрушение закладочного материала); обозначения см. на рис. 1

Fig. 7. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (collapse of backfill material). Designations same as in Fig. 1

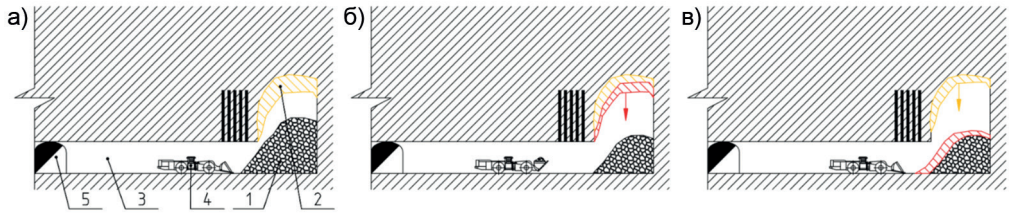


Рис. 8. Схема формирования и проявления опасностей в камере (формирование естественного свода обрушения при отработке слепых камер); обозначения см.на рис. 1

Fig. 8. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (formation of a natural collapse arch during mining of blind stopes). Designations same as in Fig. 1

С развитием беспилотных технологий идентификация опасных зон в очистном пространстве позволит своевременно вывести ПДМ из опасной зоны до устранения риска обрушения закладочного материала, а выявление мест вывалов может способствовать снижению показателей разубоживания добываемых руд.

Данные рис. 8 отражают механизм проявления неустойчивых зон при отработке слепых камер (формирование естественного свода обрушения). Данный вид опасности формируется по мере отгрузки рудной массы из очистного пространства. Характер проявления данного вида опасностей носит временной характер.

Так как прогнозные методы не учитывают фактор времени, точность прогноза повышается при систематическом мониторинге различными методами из призабойной части камеры с совместным анализом телеметрических данных о работе ПДМ.

На рис. 9 приведена схема формирования и проявления опасностей в результате слёживания, переуплотнения рудной массы в ходе взрыва, переувлажнения, консолидации мелкой фракции и т.п. В любом случае, по мере выпуска рудной массы из камеры по контактам зон ослабления часть отбитой рудной массы поступает в забой прогнозируемо, по мере выпуска и отгрузки. Часть слежавшейся, переувлажненной, смерзшейся рудной массы по мере выпуска может в аварийном режиме обрушиться, нарушая нормальный режим работы ПДМ. Применение адекватного набора методов и средств исследования состояния очистного пространства позволит своевременно выявлять наличие таких переувлажненных, неподвижных зон (на базе сопоставимого анализа изменения состояния очистного пространства

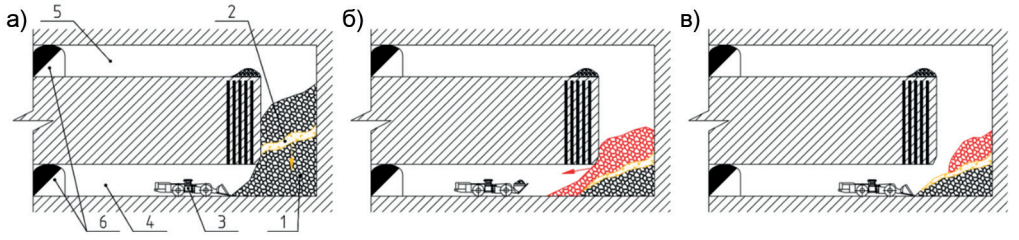


Рис. 9. Схема формирования и проявления опасностей в камере (обрушение отбитой рудной массы по контактам неоднородных зон); обозначения см. на рис. 1

Fig. 9. Schematic of hazard formation and manifestation in a chamber (collapse of broken ore mass along contacts of heterogeneous zones). Designations same as in Fig. 1

в верхней части, из выработок вентиляционно-закладочного горизонта и со стороны забоя). Частным случаем рис. 9 является формирование внутри развала рудной массы каверн (полостей), когда по мере выпуска извлечение разрыхленной рудной массы приводит к созданию пустот значительного объема, схлопывающихся в дальнейшем.

Разработанные схемы позволяют представить условия и механизмы проявления опасностей в динамике выпуска рудной массы. Развитие представлений об опасных явлениях и процессах в ходе очистной выемки дистанционно управляемыми и автономными погрузочно-доставочными машинами позволит представить их в виде соответствующих системных обобщений, например, классификации по признаку вида и масштаба опасного явления.

Также разработанные схемы формирования и проявления опасностей в открытом очистном пространстве являются основой для создания стендов физического моделирования и цифровых моделей выпуска рудной массы из подземных очистных камер.

Заключение

Рассмотренные опасные явления и процессы представляют реальную угрозу безопасному производству подземных горных работ. Случаи повреждения и завалов ПДМ по мере торцевого выпуска и отгрузки рудной массы достаточно часты на производстве. Описанные в статье схемы наглядно отражают виды опасностей в очистных камерах, могут являться основой для выбора методов и средств оценки состояния очистного пространства — из выработок откаточного либо вентиляционно-закладочного горизонтов. К таким технологиям относятся применяемые методы лазерного сканирования, видеонаблюдения и фотограмметрии, качество которых может быть существенно выше с применением беспилотных технических средств для мониторинга состояния всего очистного пространства, куда человеку доступ запрещен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Громов Е. В.* Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 90—108.

2. *Siddharth D., Bodin U., Andersson U.* Key challenges in automation of earth-moving machines // Automation in Construction. 2016, vol. 68, pp. 212—222. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.009.

3. *Larsson J.* Unmanned operation of load-haul-dump vehicles in mining environments // Orebro Studies in Technology. 2011, vol. 51, pp. 1—68.

4. *Marshall J. A.* Robotics in Mining / Ed. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. 2nd ed., 2016, pp. 1549—1576. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_59.

5. *Прокопьева В. М., Каймонов М. В.* Обзор роботизированной техники в горном деле // Интерактивная наука. — 2023. — № 8 (84). — С. 49—53.

6. *Радченко Д. Н., Федотенко В. С., Аверин А. П.* Особенности проектирования горнотехнических систем с автономным и дистанционно управляемым оборудованием в связи с добычей твердых полезных ископаемых подземным способом в условиях экстремальных сред // Экстремальная робототехника. — 2024. — № 1(35). — С. 479—483.

7. *Радченко Д. Н., Сыровацкий Р. А.* Автоматизация процесса очистной выемки при согласованной работе средств доставки рудной массы и мониторинга состояния открытого очистного пространства / Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и акустика: Сборник трудов XIII Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума. — Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Юж. федер. ун-та, 2024. — С. 182—189.

8. *Zhou J., Zhang Y., Li C., He H., Li X.* Rockburst prediction and prevention in underground space excavation // Underground Space. 2024, vol. 14, pp. 70—98. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.009.

9. *Tampier C., Mascaro M., Ruiz-del-Solar J.* Autonomous loading system for Load-Haul-Dump (LHD) machines used in underground mining // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 18, pp. 1 — 27, article 8718. DOI: 10.3390/app11188718.

10. *Неверов А. А.*, *Неверов С. А.* К вопросу об автоматизации очистных работ при освоении систем разработки с обрушением и закладкой // Вестник КузГТУ. — 2010. — № 4. — С. 3 — 10.

11. *Ran J. J.* Safe mining practices under wide spans in underground non-caving mines — Case studies // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, vol. 29, pp. 535 — 540. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.006.

12. *Guggari V. B.*, *Hemant K., Gnananandh B.* Numerical analysis for assessing the effects of crown pillar thickness on ore dilution around the sub-level open stopes // Ain Shams Engineering Journal. 2024, vol. 15, no. 1, article 102301. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102301.

13. *Szmigiel A., Apel D., Pourrahimian Y., Pu Y.* Exploring machine learning techniques for open stope stability prediction: A comparative study and feature importance analysis // Rock Mechanics Bulletin. 2024, vol. 4, article 100146. DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.100146.

14. *Taheri S., Topal E.*, *Nguyen H. J.*, *Faradonbeh R. S.* Predicting overbreak and underbreak in underground longhole stoping using meta-soft computing models // Tunnelling and Underground Space Technology. 2025, vol. 164. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106852.

15. *Heidarzadeh S., Saeidi A., Rouleau A.* Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, vol. 29, no. 3, pp. 399 — 408. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.05.011.

16. *Cui X., Yang S., Zhang J.* Optimization of stope structure parameters by combining Mathews stability chart method with numerical analysis in Halazi iron mine // Heliyon. 2024, vol. 10, no. 4. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26045.

17. *Manzoor S., Gustafson A., Schunnesson H.* Modelling the relationship between oversize fragments and nature of rock mass for a sublevel caving operation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023, vol. 169, article 105433. DOI: 10.1016/j.ijrmms.

18. *McKinnon C., Marshall J.* Automatic identification of large fragments in a pile of broken rock using a time-of-flight camera // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014, vol. 11, no. 3, pp. 935 — 942. DOI: 10.1109/TASE.2014.2308011.

19. *Курчин Г. С.*, *Шигин А. О.*, *Анушенков А. Н.*, *Кирсанов А. К.*, *Волков Е. П.* Использование беспилотных летательных аппаратов для управления процессами подземных горных работ // Маркшейдерия и недропользование. — 2025. — № 1. — С. 82 — 86. DOI: 10.56195/2079-3332-2025-25-1-82-86.

20. *Joseph C., Gudekar A., Balooni S., Kumare D.* Enhancing mining efficiency and safety with autonomous drone technology / Conference: 43rd INCA International Congress. 2023, pp. 135 — 141. ГИАБ

REFERENCES

1. Gromov E. V. Digital transformation of technological processes in underground mining: retrospective analysis and global experience. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 8, pp. 90 — 108. [In Russ].

2. Siddharth D., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016, vol. 68, pp. 212 — 222. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.009.

3. Larsson J. Unmanned operation of load-haul-dump vehicles in mining environments. *Orebro Studies in Technology*. 2011, vol. 51, pp. 1 — 68.

4. Marshall J. A. Robotics in Mining. Siciliano B., Khatib O. (Eds.) *Springer Handbook of Robotics*. 2nd ed., 2016, pp. 1549 — 1576. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_59.

5. Prokopieva V. M., Kaimonov M. V. Review of Robotic Technology in Mining. *Interactive Science*. 2023, no. 8 (84), pp. 49 — 53. [In Russ].

6. Radchenko D. N., Fedotenko V. S., Averin A. P. Design features of mining systems with autonomous and remotely controlled equipment for underground mining of solid minerals in extreme environments. *Extreme robotics*. 2024, no. 1(35), pp. 479 — 483. [In Russ].

7. Radchenko D. N., Syrovatsky R. A. Automation of the stoping process through coordinated operation of ore haulage and open stope condition monitoring systems. *Problemy avtomatizatsii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i akustika: sbornik trudov XIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii i molodezhnogo nauchnogo foruma* [Problems of automation. Regional management. Communication

and acoustics. Proceedings of the XIII All-Russian Scientific Conference and Youth Scientific Forum], Rostov-na-Donu; Taganrog, 2024, pp. 182 — 189. [In Russ].

8. Zhou J., Zhang Y., Li C., He H., Li X. Rockburst prediction and prevention in underground space excavation. *Underground Space*. 2024, vol. 14, pp. 70 — 98. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.009.

9. Tampier C., Mascaro M., Ruiz-del-Solar J. Autonomous loading system for Load-Haul-Dump (LHD) machines used in underground mining. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 18, pp. 1 — 27, article 8718. DOI: 10.3390/app11188718.

10. Neverov A. A., Neverov S. A. On the automation of stoping operations in the development of caving and backfilling mining systems. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010, no. 4, pp. 3 — 10. [In Russ].

11. Ran J. J. Safe mining practices under wide spans in underground non-caving mines — Case studies. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, pp. 535 — 540. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.006.

12. Guggari V. B., Hemant K., Gnananandh B. Numerical analysis for assessing the effects of crown pillar thickness on ore dilution around the sub-level open stopes. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024, vol. 15, no. 1, article 102301. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102301.

13. Szmigiel A., Apel D., Pourrahimian Y., Pu Y. Exploring machine learning techniques for open stope stability prediction: A comparative study and feature importance analysis. *Rock Mechanics Bulletin*. 2024, vol. 4, article 100146. DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.100146.

14. Taheri S., Topal E., Nguyen H. J., Faradonbeh R. S. Predicting overbreak and underbreak in underground longhole stoping using meta-soft computing models. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025, vol. 164. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106852.

15. Heidarzadeh S., Saeidi A., Rouleau A. Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, no. 3, pp. 399 — 408. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.05.011.

16. Cui X., Yang S., Zhang J. Optimization of stope structure parameters by combining Mathews stability chart method with numerical analysis in Halazi iron mine. *Heliyon*. 2024, vol. 10, no. 4. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26045.

17. Manzoor S., Gustafson A., Schunnesson H. Modelling the relationship between oversize fragments and nature of rock mass for a sublevel caving operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023, vol. 169, article 105433. DOI: 10.1016/j.ijrmms.

18. McKinnon C., Marshall J. Automatic identification of large fragments in a pile of broken rock using a time-of-flight camera. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2014, vol. 11, no. 3, pp. 935 — 942. DOI: 10.1109/TASE.2014.2308011.

19. Kurchin G. S., Shigin A. O., Anushenkov A. N., Kirsanov A. K., Volkov E. P. The use of unmanned aerial vehicles for managing underground mining processes. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025, no. 1, pp. 82 — 86. [In Russ]. DOI: 10.56195/2079-3332-2025-25-1-82-86.

20. Joseph C., Gudekar A., Balooni S., Kumare D. Enhancing mining efficiency and safety with autonomous drone technology. *Conference: 43rd INCA International Congress*. 2023, pp. 135 — 141.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каплунов Давид Родионович[1] — член-корреспондент РАН,
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник,
e-mail: kapdan@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7199-5453,
Радченко Дмитрий Николаевич[1] — канд. техн. наук, доцент,
ведущий научный сотрудник, e-mail: mining_expert@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1821-3840,
Сыровацкий Роман Анатольевич[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: r_syrovatskii@mail.ru,
[1] Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН.
Для контактов: Радченко Д.Н., e-mail: mining_expert@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.R. Kaplunov[1], Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,
e-mail: kapdan@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0001-7199-5453,
D.N. Radchenko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Leading Researcher, e-mail: mining_expert@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1821-3840,
R.A. Syrovatskiy[1], Junior Researcher, e-mail: r_syrovatskii@mail.ru,
[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,
Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: D.N. Radchenko, e-mail: mining_expert@mail.ru.

Получена редакцией 01.08.2025; получена после рецензии 06.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 01.08.2025; received after the review 06.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ И УЧЕТА ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ

(2025, № 8, СВ 12, 24 с.)

Федоров Денис Анатольевич — аспирант, e-mail: fedorov@vgsch.ru, НИТУ МИСИС,
Кобылкин Сергей Сергеевич — докт. техн. наук, профессор, e-mail: kobylkin.s@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2626-208X, НИТУ МИСИС.

Для определения величины дополнительной депрессии, затрачиваемой на преодоление движущегося препятствия, предлагается использовать численное трехмерное моделирование. Величина лобового аэродинамического сопротивления не постоянная. Она зависит от скорости движения горных машин и воздуха, формы и площади сечения горной выработки и миделева сечения перемещающегося препятствия. Разработанные рекомендации позволяют рассчитать величину дополнительной депрессии, затрачиваемой на преодоление лобового аэродинамического сопротивления, значения этого вида сопротивления и соответствующего коэффициента. При проектировании проветривания для обеспечения безопасности рекомендуется принимать максимальное значение лобового аэродинамического сопротивления. Предложенный алгоритм учета лобового аэродинамического сопротивления при расчете вентиляции апробирован и может быть использован на шахтах и рудниках. В примере показано, что неучитывание лобового аэродинамического сопротивления может привести к уменьшению расхода воздуха на 20% по отношению к расчетной величине.

Ключевые слова: безопасность, шахта, проветривание, лобовое аэродинамическое сопротивление, эксперимент, численное моделирование, проектирование.

PROCEDURE FOR DETERMINING AND ACCOUNTING FOR FRONTAL AERODYNAMIC RESISTANCES WHEN DESIGNING MINES VENTILATION

D.A. Fedorov, Graduate Student, e-mail: fedorov@vgsch.ru, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
S.S. Kobylkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: kobylkin.s@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2626-208X, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

To determine the amount of additional depression spent on overcoming an obstacle, it is proposed to use numerical three-dimensional modeling or a field experiment. The amount of frontal aerodynamic drag is not constant. It depends on the speeds of movement of mining machines and air, the shape and cross-sectional area of the mine and the midsection of the moving obstacle. When designing for safety, it is recommended to take the maximum value of the frontal aerodynamic drag. The proposed algorithm for accounting for frontal aerodynamic drag in the calculation of ventilation has been tested and can be used in mines and mines. The example shows that failure to take into account frontal aerodynamic drag can lead to a 20% decrease in air consumption relative to the calculated value.

Key words: safety, mine, ventilation, frontal aerodynamic resistance, experiment, numerical modeling, design.