

Исследование газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» и разработка комплекса мер по их предупреждению

В.С. Зыков¹, О.В. Тайлаков¹✉, А.А. Вьюников², С.Г. Ворожцов²

¹ АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Российская Федерация

² АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация
✉ oleg2579@gmail.com

Резюме: Представлены результаты исследований условий возникновения и механизма уникальных газодинамических явлений – внезапных выбросов доломитов и газа на руднике «Интернациональный», происходящих на глубинах свыше 1000 м. Результаты исследований показали, что практически все эти газодинамические явления могут быть отнесены к внезапным выбросам породы и газа. Они различаются только тем, что остановились на разных стадиях развития данного явления. Установлено, что газодинамические явления на руднике являются комплексными. Вначале происходит хрупкое разрушение (микроудар) на кромке выбросоопасного слоя породы. Микроудар является триггером возникновения внезапного выброса породы и газа. Эта особенность явлений требует особого подхода к их прогнозированию с целью повышения достоверности результатов.

Выполненные исследования позволили разработать комплекс мер по предупреждению газодинамических явлений, включающий: 1 – прогнозирование зон, опасных по внезапным выбросам породы и газа; 2 – способы приведения выбросоопасных зон в неопасное состояние; 3 – безопасные режимы ведения взрывных работ при проходке горных выработок по склонным к внезапным выбросам слоям горных пород; 4 – исследования по разработке безопасных технологий проходки выработок комбайновым способом выемки пород.

Приведены результаты опытно-промышленных испытаний комплекса мер по прогнозу и предотвращению внезапных выбросов породы и газа при проведении горных выработок на руднике и перспективы их практического применения.

Ключевые слова: рудник «Интернациональный», газодинамические явления, внезапные выбросы породы, внезапные выбросы газа, прогноз выбросоопасности, способы предотвращения газодинамических явлений, взрывные работы, передовое скважинное торпедирование

Для цитирования: Зыков В.С., Тайлаков О.В., Вьюников А.А., Ворожцов С.Г. Исследование газодинамических явлений на руднике «Интернациональный» и разработка комплекса мер по их предупреждению. *Горная промышленность*. 2023;(2):126–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-126-133>

Research into gas dynamic phenomena at the Internatsionalny mine and designing complex measures for their prevention

V.S. Zykov¹, O.V. Tailakov¹✉, A.A. Viyunikov², S.G. Vorozhtsov²

¹ Research Centre for Industrial and Environmental Safety in the Mining Sector, Vostochniy Research Institute, Kemerovo, Russian Federation

² ALROSA, Mirnyi, Russian Federation
✉ oleg2579@gmail.com

Abstract: The paper reviews the results of research into the conditions and mechanisms of unique gas-dynamic phenomena, i.e. sudden dolomites and gas outbursts at the Internatsionalny mine which occur at depths of over 1,000 m. The research results have shown that almost all of these gas-dynamic phenomena can be classified as sudden rock and gas outbursts. They are different only in the fact that they stopped at various development stages of this phenomenon. It is established that the gas-dynamic phenomena in the mine have a complex nature. Initially, brittle failure (a micro burst) takes place at the edge of the outburst-prone rock layer. The micro burst acts as the trigger for a sudden outburst of rock and gas. This specific feature of the phenomena calls for a special approach to their prediction in order to improve the reliability of the results.

The performed research helped to develop a set of measures to prevent the gas-dynamic phenomena, which includes: (1) prediction of zones prone to sudden rock and gas outbursts; (2) ways of bringing the outburst-prone zones to a non-hazardous state; (3) safe modes of blasting operations when driving mine workings through the rock layers prone to sudden outbursts; (4) research into the development of safe technologies to drive mine workings using roadheaders.

The results are presented of pilot testing complex measures for predicting and preventing sudden rock and gas outbursts when driving mine workings and the prospects for their practical application are described.

Keywords: Internatsionalny mine, gas-dynamic phenomena, sudden rock outbursts, sudden gas outbursts, prediction of gas hazards, ways to prevent gas-dynamic phenomena, blasting operations, advanced shot-firing

For citation: Zykov V.S., Tailakov O.V., Viyunikov A.A., Vorozhtsov S.G. Research into gas dynamic phenomena at the Internatsionalny mine and designing complex measures for their prevention. *Russian Mining Industry*. 2023;(2):126–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-126-133>

Введение

При ведении горных работ на руднике «Интернациональный» на глубинах, приближающихся к 1200 м, возникла серьезная и очень сложная проблема, связанная с обеспечением безопасности горных работ. Она заключается в проявлениях в процессе отбойки угля сложных и опасных газодинамических явлений – внезапных выбросов породы и газа.

Как показывает анализ мировой практики, проявление выбросов породы и газа в доломитах – факт уникальный. Они отличаются от других динамических явлений, составляющих существующую энергетически-силовую классификацию геодинамических явлений [1–4], возникающих при освоении недр и земной поверхности, и впервые в мировой практике происходят в доломитах. По характеру проявления они наиболее близки к внезапным выбросам породы и газа, происходящим на угольных шахтах Донбасса [5; 6]. Однако, если в Донбассе идет подпитка метаном пород (песчаников) из угольных пластов, то здесь этого нет.

Потенциально выбросоопасными являются слои пород с низкими не характерными для выбросоопасных пластов

значениями газоносности. Перед газодинамическими явлениям (далее – ГДЯ), как правило, отсутствуют предупредительные признаки. Особенностью является также то, что прочности пород выбросоопасных пластов выше прочности вмещающих их пород.

Чрезвычайно опасным представляется состав газа, содержащегося в потенциально опасных по выбросам породах, который охарактеризован Горным институтом Пермского ФИЦ УРО РАН как «гремучий газ»¹. Содержание метана в отдельных пробах, согласно исследованиям этого института, достигает 84,5%, водорода – 10,5%. Максимальное значение газоносности выбросоопасного слоя доломита бежевого было отмечено в спиральном съезде и составило 2,3 м³/м³, а максимальное значение газоносности слоя невыбросоопасного доломита глинистого получено в автоуклоне и составило 2,86 м³/м³.

Всего, начиная с первого внезапного выброса породы и газа на глубине 1190 м, на руднике «Интернациональный» произошло 36 газодинамических явлений (табл. 1).

Из них всего 3 явления отнесены к внезапным выбросам породы и газа (табл. 2).

Таблица 1
Сведения о газодинамических явлениях на руднике «Интернациональный»

Газодинамические явления (названия определены специалистами рудника)	Количество явлений	Примечания по наименованиям явлений
Выбросы породы и газа	3	Отличаются от внезапных выбросов угля и газа низкими удельными газовыделениями на единицу объема выработанной массы
Выброс (отторжение) без газодинамики	4	Рекомендуется относить к внезапным выдавливаниям породы
ГДЯ слабой интенсивности	3	Можно отнести к внезапным отжимам с повышенным газовыделением
Газодинамические эффекты	23	Значительное число явлений может быть отнесено к внезапным выбросам породы и газа
Образование линз	3	Скорее, это тоже выбросы породы и газа
Всего ГДЯ	36	

Table 1
Information on gas dynamic phenomena at the Internatsionalny mine

Таблица 2
Характеристика внезапных выбросов породы и газа на руднике «Интернациональный»

Дата	Выработка	Абсолютная отметка, м	Мощность, м ³	Интенсивность, м ³	Максимальная концентрация метана после выброса, %	Дальность отброса породы, м
18.01.2022	Автоуклон ЭБ №11	–865 м	300	1374	24	16
26.04.2022	Автоуклон ЭБ №11	–875 м	336	1301	18	22
07.05.2022	Автоуклон ЭБ №11	–876 м	1000	421	28	30

Table 2
Characteristics of sudden outbursts of rock and gas in the Internatsionalny mine

¹ Провести исследования и разработать рекомендации по безопасному ведению горных работ на отм. –790 м/–1250 м на руднике «Интернациональный» при проходке выработок в породах, склонных к выбросам породы и газа. Отчет о НИР/ Ги УРО РАН; Исп. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А. и др. Х.Д. №050–18/07, этап 5. Пермь, 2018. 33 с.

Но все остальные представляются теми же выбросами, остановившимися на промежуточных стадиях их развития. Глубина их проявления составила 1265–1276 м, мощность – от 300 до 1000 м³, масса выброшенной породы – от 780 т до 2600 т.

Результаты исследований

В результате исследований установлена существенная особенность в механизме внезапных выбросов доломита и газа, заключающаяся в том, что это явление, учитывая достаточно высокую прочность выбросоопасной породы, возможно только в том случае, если на кромке забоя происходит хрупкое разрушение (микроудар), после которого стартует послойное отделение породы от горного массива под действием давления газа и отброс её в горную выработку. Микроудар является триггером начала внезапного выброса.

С учётом изложенного можно представить следующие причины и механизм внезапных выбросов породы и газа на руднике «Интернациональный».

1. При ведении горных работ на сверхглубинах концентрация напряжений вблизи кромки забоя достигает качественно нового значения по своей величине.

Так, на глубине первого внезапного выброса породы и газа согласно гидростатическому закону расчётная величина напряжений составляет около 31 МПа. Кроме того, в зоне концентрации напряжений в окрестности забоя их величина может быть ещё в 1,5–2,0 раза выше [7; 8]. Естественно, при такой величине напряжений выбросоопасный пласт доломитов будет находиться в состоянии, близком к хрупкому разрушению.

2. При выемке породы новая плоскость забоя перемещается вглубь ближе к максимуму опорного давления, напряжения вблизи кромки забоя скачкообразно возрастают и превышают предел прочности породы.

3. Прилежащий к забою слой породы хрупко разрушается с отбросом фрагментов породы от забоя.

4. Слой породы между обнажением и ближайшей системой трещин, квазипараллельных забою, разрушается за счёт давления газа. Затем разрушается и отбрасывается за счёт еще более высокого давления газа следующий слой, затем еще следующий, и начинается процесс послойного отделения породы.

5. В процессе послойного отделения породы происходит газовое дробление блоков и кусков породы, содержащих в трещинах газ под высоким давлением, до мелких и тонких фракций.

6. За счёт перепада давления происходит перемещение разрушенной массы породы в газовом потоке по горной выработке и ее последующее размещение под углом меньше угла естественного откоса, характерного для перемещаемого вида пород.

Динамические явления на руднике «Интернациональный» являются комплексными. Им присущ главный элемент горного удара – хрупкое разрушение породы вблизи плоскости обнажения. В процессе рассматриваемых явлений активную работу совершают и газ, и горное давление. Именно такие явления и называются газодинамическими.

Условия хрупкого разрушения горных пород представлены в многочисленных работах исследователей [9–16].

Например, практически применимым является условие хрупкого разрушения, которое можно представить следующей формулой [17]:

$$D_y = \frac{K_k \gamma H - \sigma_3}{x_{cp}^a} \geq 10, \tag{1}$$

где K_k – коэффициент концентрации напряжений; γH – напряжения на глубине проведения выработки, МПа; σ_3 – напряжения на линии забоя, МПа; x_{cp}^0 – расстояние от забоя до области максимальных напряжений, м.

Для оценки возможности развязывания внезапного выброса породы и газа вслед за микроударом на кромке выбросоопасного пласта может использоваться следующее условие [18–20]:

$$\frac{F_a}{F_{п}} = \frac{\sqrt[3]{m_x^2} \left(\frac{dP}{dx} \right)}{\tau \frac{P_b}{S_b}} \geq 1, \tag{2}$$

где F_{ax} – активная сила, стремящаяся выбросить слой выбросоопасной породы, на расстоянии x от забоя; $F_{пx}$ – пассивная сила, препятствующая развязыванию внезапного выброса; m_x – пористость рассматриваемого слоя породы в зоне влияния выработки; $\left(\frac{dP}{dx} \right)$ – градиент газового давления; P_b и S_b – соответственно периметр и площадь обнаженного слоя выбросоопасной породы в сечении выработки; τ – касательные напряжения по периметру P .

Учитывая, что выброс развивается из выбросоопасного слоя породы на расстоянии x от плоскости забоя, условие (2) выразится в виде:

$$\frac{F_{ax}}{F_{пx}} = \frac{P_x S_b \sqrt[3]{m_x^2}}{\tau P_b x} \geq 1, \tag{3}$$

где P_x – избыточное давление газа на расстоянии x от забоя; m_x – пористость выбросоопасного слоя массива на расстоянии x от забоя; S_b , P_b – соответственно площадь и периметр поперечного сечения потенциально выбросоопасного слоя породы в месте подвигания забоя, м; τ – касательные напряжения по периметру P_b .

Исходя из вышеизложенного нельзя отрицать удароопасность горных пород рудника «Интернациональный». Микроудары, происходящие вблизи кромки выбросоопасного слоя доломита при выемке породы, особенно при мгновенном внедрении в массив взрывными работами, являются триггерами внезапного выброса породы и газа, а затем работает газ.

Из описанного механизма внезапных выбросов следует, что текущий прогноз опасности по выбросам должен быть комплексным и позволять оценивать возможность двухступенчатого запуска явления. Приведённые выше условия неприемлемы для текущего прогноза выбросоопасности, т. к. их параметры не могут быть оперативно определены непосредственно в забое выработки.

Что касается условия (2), то оно было подробно исследовано в работах [21–23] и трансформировано в показатель, применимый для целей текущего прогноза выбросоопасности пород:

$$B_n = \frac{1,25(g_{n,max} - g_{n,z})S_b}{\int P_b \cdot g_n} \geq 1. \tag{4}$$

Критерий (1) может быть положен в основу разработки показателя опасности хрупкого разрушения (микроуда-

Таблица 3
Комплекс мер по прогнозу и предотвращению внезапных выбросов породы и газа при проведении горных выработок

Методы прогноза опасности по внезапным выбросам породы и газа	Мероприятия по предотвращению внезапных выбросов породы и газа
1. Локальный прогноз выбросоопасности при проведении горно-капитальных и горно-подготовительных выработок	Передовое скважинное торпедирование
2. Текущий прогноз выбросоопасности по структуре горного массива и начальной скорости газовыделения из шпуров при проведении горных выработок	Передовое законтурное шпуровое торпедирование
3. Прогноз выбросоопасности при вскрытии потенциально выбросоопасного слоя породы	Создание передовой разгрузочной полости и ограничение по скорости и глубине отбойки пород и фоновой концентрации метана при механизированной проходке
– по давлению газа и коэффициенту крепости породы в выбросоопасном слое	
– по начальной скорости газовыделения из скважин	
4. Геофизические методы прогноза выбросоопасности	Мероприятия по контролю эффективности выполнения противовыбросных мероприятий
Прогноз выбросоопасности методом ЕЭМИ – контактное и бесконтактное зондирование забоя	Контроль эффективности по начальной скорости газовыделения из шпуров на основе МИГ-Ц1
Прогноз выбросоопасности по естественной акустической эмиссии (ЕАЭ)	Контроль эффективности геофизическими методами приборами «Ангел-М», «Сапфир-СБ32»
	Контроль эффективности геологическими методами

ра) на кромке выбросоопасного слоя породы по активности электромагнитного излучения, которая нарастает при приближении к моменту разрушения [24]. Такими исследованиями наиболее активно сейчас занимается АО ВНИМИ [25–27].

Помимо исследований природы и механизма происходящих на руднике газодинамических явлений, заказчиком выполняемой АО «НЦ ВостНИИ» научно-исследовательской работы – компанией АЛРОСА – была поставлена задача по разработке комплекса мероприятий по их прогнозу и предотвращению при проведении горных выработок, результаты решения которой отражены в табл. 3. Из всех разработанных мероприятий особо следует отметить испытание и внедрение на руднике нового способа противовыбросного воздействия на горный массив на участке проведения подготовительных выработок – передового скважинного торпедирования (ПСТ) горного массива длинными скважинами большого диаметра. Образующиеся в результате взрыва искусственные концентраторы напряжений в виде зон радиальных трещин и разрушенных контактов в плоскостях напластования по мере приближения забоя горной выработки прорастают в магистральные трещины.

Последние расчленяют массив пород основной кровли на блоки по высоте и напластованию. В результате снижаются напряжение и давление газа в окрестности забоя.

Опытно-промышленные испытания передового скважинного торпедирования горного массива выполнены в слоевых заездах №28, №26 и №6 согласно разработанным проектам буровзрывных работ скважинными зарядами патронированного аммонита №6ЖВ с диаметром скважин, равным 110 мм, с постепенным увеличением глубины торпедирования с 10 до 30 м. Видеосъёмка во взрывных скважинах показала развитие радиальных и диагональных трещин и наличие обломочного материала. Усилилось

Table 3
Complex measures to predict and prevent sudden rock and gas outbursts when driving mine workings

Методы прогноза опасности по внезапным выбросам породы и газа	Мероприятия по предотвращению внезапных выбросов породы и газа
1. Локальный прогноз выбросоопасности при проведении горно-капитальных и горно-подготовительных выработок	Передовое скважинное торпедирование
2. Текущий прогноз выбросоопасности по структуре горного массива и начальной скорости газовыделения из шпуров при проведении горных выработок	Передовое законтурное шпуровое торпедирование
3. Прогноз выбросоопасности при вскрытии потенциально выбросоопасного слоя породы	Создание передовой разгрузочной полости и ограничение по скорости и глубине отбойки пород и фоновой концентрации метана при механизированной проходке
– по давлению газа и коэффициенту крепости породы в выбросоопасном слое	
– по начальной скорости газовыделения из скважин	
4. Геофизические методы прогноза выбросоопасности	Мероприятия по контролю эффективности выполнения противовыбросных мероприятий
Прогноз выбросоопасности методом ЕЭМИ – контактное и бесконтактное зондирование забоя	Контроль эффективности по начальной скорости газовыделения из шпуров на основе МИГ-Ц1
Прогноз выбросоопасности по естественной акустической эмиссии (ЕАЭ)	Контроль эффективности геофизическими методами приборами «Ангел-М», «Сапфир-СБ32»
	Контроль эффективности геологическими методами

дренирование газа из массива, что показали замеры концентрации газа в скважинах.

О снижении опасности по газодинамическим явлениям в результате выполненного мероприятия свидетельствовали и значения показателя выбросоопасности $g_{н.мах}$ ниже критического значения 4 л/мин, а также отсутствие ГДЯ и их предупредительных признаков на участках выработок, соответствующих расположению скважин передового торпедирования. Существенное преимущество ПСТ перед другими способами воздействия на горный массив заключается в том, что при глубине торпедирования до 30 м осуществляется разгружающее воздействие на массив сразу на участке большой протяжённости по направлению движения выработки. Это позволит проводить горные выработки более высокими темпами, чем, например, с бурением разгрузочно-дегазационных скважин.

Очень важно отметить, что безопасность способа обеспечивалась полной инертризацией призабойного пространства применением водораспылительных в сочетании с туманообразующими завесами при производстве взрывных работ в процессе ПСТ.

Естественно, что взрывное воздействие на массив может быть неравномерным по глубине воздействия на массив, и в неразгруженных зонах, устанавливаемых контролем эффективности мероприятия по значению $g_{н.мах}$, потребуются применение дополнительного противовыбросного мероприятия.

Параллельно при проведении ОПИ совершенствовались параметры другого, применявшегося ещё до проведения ОПИ, мероприятия по предупреждению внезапных выбросов – передового законтурного шпурового торпедирования массива (далее – ПЗШТ). Цель его применения схожа с целью применения ПСТ, но осуществляется на глубину 4,4–7, 0 м из оконтуривающих горную выработку шпуров.

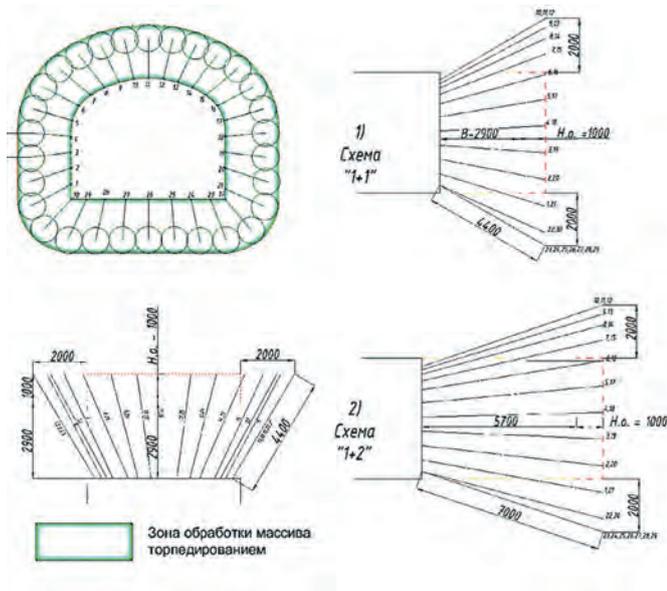


Рис. 1
Схемы передового законтурного скважинного торпедирования

Fig. 1
Layouts of advanced peripheral shot-firing

Это мероприятие включено непосредственно в цикл буровзрывных работ (далее – БВР) по подвиганию забоя выработки и является первой их фазой. Оно решает задачу предотвращения или снижения интенсивности и частоты выбросов породы и газа из массива вмещающих пород, расположенного за контуром призабойной части выработки, и представляет собой камуфлетное взрывание зарядов в шпурах диаметром 43 мм, пробуренных по всему контуру выработки с выходом их концов на расстояние 2 м за контур выработки.

Вторая фаза – это взрывная отбойка породы в забое по уходу. После каждого цикла ПЗШТ выполняются два цикла подвигания забоя на 2,5 м (неснижаемое опережение – 2,0 м).

Существуют схема «1+1» и схема «1+2» применения ПЗШТ (рис. 1).

При применении первой схемы длина шпуров для торпедирования составляет 4,4 м, что, с учётом разворота шпуров, обеспечивает законтурную обработку выработки на 3,9 м впереди забоя. При неснижаемом опережении 1,0 м выработка может быть продвинута по уходу на 2,9 м. Схема рекомендуется к применению на криволинейных участках выработок, при засечке новой выработки, разработке сопряжений.

При применении второй схемы с длиной шпуров для торпедирования 7 м обеспечивается последующее подвигание забоя по уходу на 5,7 м и применяется на прямолинейных участках выработки.

Успешно проведены испытания ещё одного, третьего, способа предотвращения внезапных выбросов породы и газа – бурения разгрузочно-дегазационных скважин, показавшие его эффективное воздействие на горный массив с точки зрения воздействия на газовый фактор.

Согласно результатам испытаний радиус эффективного влияния скважины диаметром 120 мм на массив по наслоению пород гн составляет 1,0 м, а вкрест наслоения гк – 0,5 м (рис. 2).

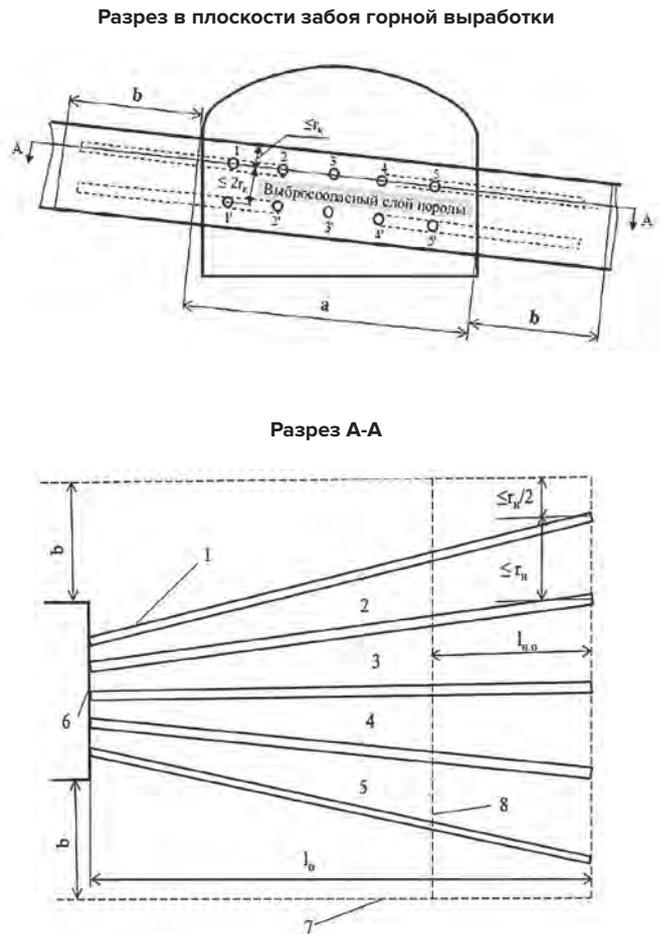


Рис. 2
Схема бурения опережающих скважин из забоя горной выработки:
1–5, 1'–5' – опережающие скважины; 6 – забой горной выработки; 7 – граница зоны законтурной обработки выбросоопасного слоя; 8 – граница зоны неснижаемого опережения

Fig. 2
Layout of drilling advanced boreholes from the mine face:
1–5, 1'–5' – advance boreholes; 6 – mine face; 7 – boundary of the peripheral treatment zone of the outbursts-prone layer; 8 – boundary of the irreducible advance zone

Исходя из этого при бурении веера разгрузочно-дегазационных скважин максимальное расстояние между скважинами в веерах составляло 2,0 м по наслоению, а между веерами – 1,0 м вкрест наслоения пород. Количество вееров зависит от мощности выбросоопасного слоя породы, а количество скважин в веере – от размера выработки в черне и ширины законтурной обработки.

Одновременно благодаря инициативе сотрудников службы ППДЯ рудника по согласованию с НИЦ ВостНИИ проведены опытно-практические работы по обеспечению безопасности комбайновой проходки при проведении горной выработки по выбросоопасным пластам породы способом создания передовой разгрузочной полости и ограничения по скорости и глубине отбойки пород и фоновой концентрации метана при механизированной проходке. При этом были получены интересные и полезные для практики комбайновой проходки результаты.

В зависимости от структуры горного массива в сечении забоя выемка пород при проведении проводилась в две очереди.

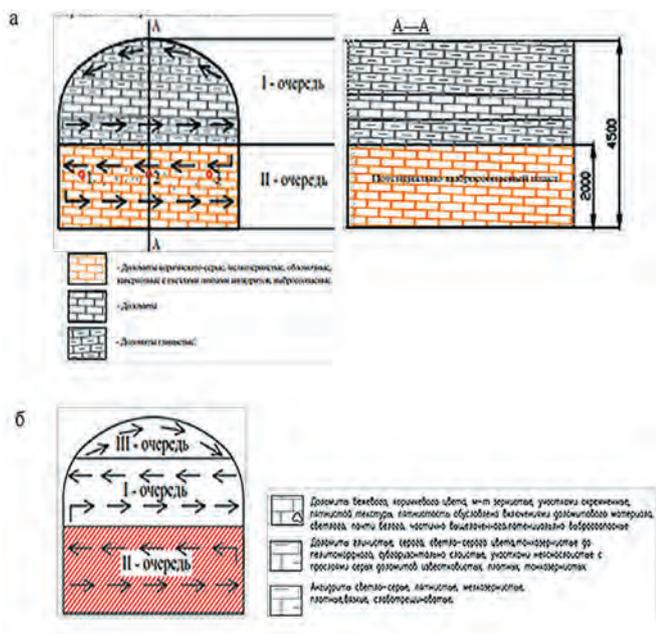


Рис. 3
Примеры двухочередного (а) и трёхочередного (б) порядка выемки угля в забое горной выработки

Fig. 3
Examples of two-stage (а) and three-stage (б) methods of coal extraction in the mine face

Очередь I представляет собой создание разгрузочной полости на глубину 650 мм в невыбросоопасном пласте (или пластах) породы для защиты выбросоопасного пласта (рис. 3).

Во вторую очередь вынимаются породы выбросоопасного пласта на глубину 250 мм. Выемка производится дорожками с углубкой шарожки в массив на 10–15 см. При появлении предупредительных признаков газодинамической опасности забоя: стрельяния, отскоков кусков породы, газовыделения из призабойной части горного массива и подъёма концентрации в процессе выемки одной дорожки по опасному слою – применяется профилактическая остановка на время 10–30 мин до момента снижения концентрации метана до 0,05–0,1% и прекращения проявления предупредительных признаков опасности.

В процессе выемки пород должно постоянно поддерживаться опережение вырубки выбросоопасного пласта разгрузочной полостью не менее чем на 400 мм (рис. 4).

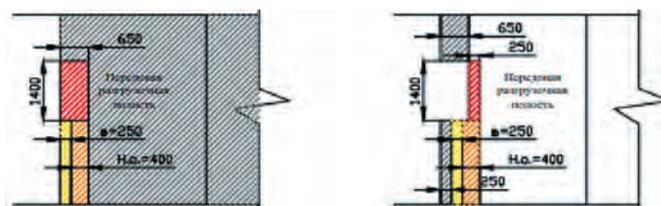


Рис. 4
Схема взаимозависимого подвигания забоя горной выработки по неопасному и выбросоопасному пластам пород

Fig. 4
Diagram of the interdependent mine face advance over a non-hazardous and an outburst-prone rock layers

Средняя скорость проходки получилась равной 44, 25 м/мес (без учёта простоев на ПЗР, ЕТО, ППР и перегонных комбайновых комплексов) и 1,47 м/сут. Для сравнения можно отметить, что при применении в качестве способа предотвращения внезапных выбросов породы и газа при бурении разгрузочных скважин значения этих скоростей составляют соответственно 15,68 м/мес и 0,52 м/сут.

Выводы

1. Установлены особенности механизма внезапных выбросов доломитов и газа, происходящих при проведении горных выработок в горных породах, вмещающих алмазное рудное тело, в условиях рудника «Интернациональный» МНГОК АК «АЛРОСА» (ПАО) и предложены методы их прогнозирования с учётом этих особенностей.
 2. Получены совместимые три способа предотвращения внезапных выбросов породы и газа, которые в самых сложных случаях могут последовательно применяться для воздействия на выбросоопасный горный массив до достижения необходимого эффекта по приведению опасных зон в неопасное состояние.
 3. Вероятность внезапного выброса при применении комбайновой выемки существенно снижается за счёт, во-первых, более плавного процесса отбойки породной массы и применения вышеописанной предварительной разгрузки кромки выбросоопасного пласта.
- Во-вторых, весьма значимым положительным фактором внедрения на руднике комбайновой проходки является увеличение скорости проходки.
- В-третьих, упрощается технология проведения выработок за счёт исключения режима сотрясательного взрывания.

Список литературы

1. Петухов И.М., Батугина И.М. *Геодинамика недр*. 2-е изд. М.: Недра; 1999. 287 с.
2. Малышев Ю.Н., Сагалович О.И., Лисуренко А.В. *Техногенная геодинамика. Книга 1: Аналитический обзор. Актуальные проблемы*. М.: Наука; 1996. 430 с.
3. Зыков В.С. *Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах*. Кемерово: Фирма ПОЛИГРАФ; 2010. 334 с.
4. Шабаров А.Н., Цирель С.В. Обеспечение геодинамической безопасности при подземной разработке месторождений. *Горный журнал*. 2017;(9):65–70. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.09.12>
5. Большинский М.И., Лысиков Б.А., Каплюхин А.А. *Газодинамические явления в шахтах*. Севастополь: Вебер; 2003. 284 с.
6. Галушко В.Т., Зорин А.Н. *Выбросы породы в горных выработках шахт Донбасса*. Киев: Наукова думка; 1972. 168 с.

7. Zykov V.S., Filatov Yu.M., Ivanov V.V. Low-pressure hydraulic impact on the coal massif and the purpose of its application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;377:012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012050>
8. Sokolov M.V., Prostov S.M., Zykov V.S. The study of stress-strain state of stabilized layered soil foundations. *E3S Web of Conferences*. 2017;15:01015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171501015>
9. Петухов И.М., Линьков А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 279 с.
10. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. *Механика деформирования и разрушения горных пород*. М.: Недра; 1992. 223 с.
11. Coates D.F., Parsons R.C. Experimental criteria for classification of rock substances. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1966;3(3):181–189. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(66\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(66)90022-2)
12. Hucka V., Das B. Brittleness determination of rocks by different methods. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1974;11(10):389–392. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91109-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91109-7)
13. Kidybiński A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1981;18(4):295–304. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)91194-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)91194-3)
14. Andreev G.E. *Brittle failure of rock materials: Test results and constitutive models*. Rotterdam: A.A. Balkema; 1995. 456 p.
15. He C., Okubo S., Nishimatsu Y. A study of the class II behaviour of rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1990;23(4):261–273. <https://doi.org/10.1007/BF01043307>
16. Tarasov V.G. Universal scale of brittleness for rocks failed at compression. In: *Proceedings of the 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne, 9–13 May 2011*. Vol. 1. Sydney; 2011, pp. 669–673.
17. Мурашев В.И., Федченко Ю.А. *Внезапные выбросы угля и газа и горные удары на шахтах России*. Кемерово: РИПК; 2001. 61 с.
18. Мурашев В.И. Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа в горных выработках. В кн.: *Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа* [сб. науч. тр.]. М.: Недра; 1978. С. 141–162.
19. Zykov V.S., Ivanov V.V. Conditions for a start of sudden coal and gas outbursts in the breakage faces of coal mines. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;823(1):012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/823/1/012024>
20. Zykov V.S., Filatov Yu.M. Hazardous manifestation of gas-dynamic phenomena in the faces of coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;206(1): 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012047>
21. Зыков В.С., Лебедев А.В., Сурков А.В. *Предупреждение газодинамических явлений при проведении выработок по угольным пластам*. Кемерово: ВостНИИ; 2010. 262 с.
22. Zykov V.S., Lee H.U. About possibilities to improve current outburst hazard prediction based on updated mechanism of coal and gas outburst. *Mining Report*. 2016;152(2):161–170. Available at: https://mining-report.de/wp-content/uploads/2016/03/MiRe_1602_Gasausbruch_Zykov_160317.pdf
23. Зыков В.С. *Техногенная геодинамика*. Кемерово: КузГТУ; 2006. 266 с.
24. Зыков В.С., Славолубов В.С., Трусов С.Е. Газоэлектромагнитный метод текущего прогноза выбросоопасности. В кн.: *Безопасность угольных предприятий* [сб. науч. тр.]. Кемерово: ВостНИИ; 2000. С. 36–43.
25. Проскуряков В.М., Шабаров А.Н., Фрид В.И. Экспресс-оценка состояния ударо- и выбросоопасности угольных пластов. *Уголь*. 1990;(3):58–59.
26. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н. Опыт применения многофункциональной аппаратуры АНГЕЛ-М в угольной и рудной промышленности. *Уголь*. 2014;(10):14–19.
27. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н., Цирель С.В., Максимов А.С., Мазья М.Д., Бондарев А.В., Баданин А.И. *Способ определения удароопасности массива горных пород по электромагнитной эмиссии и устройство для его осуществления*. Патент на изобретение №2535329. Опубликовано: 10.12.2014. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2535329C1_20141210.pdf

References

1. Petukhov I.M., Batugina I.M. *Geodynamics of underground resources*. 2nd ed. Moscow: Nedra; 1999. 287 p. (In Russ.)
2. Malyshev Yu.N., Sagalovich O.I., Lisurenko A.V. *Man-induced geodynamics. Book 1: An analytical review. Current challenges*. Moscow: Nauka; 1996. 430 p. (In Russ.)
3. Zykov V.S. *Sudden coal and gas outbursts and other gas-dynamic phenomena in mines*. Kemerovo: POLIGRAF; 2010. 334 p. (In Russ.)
4. Shabarov A.N., Tsirel S.V. Geodynamic safety in underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(9):65–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.09.12>
5. Bolshinsky M.I., Lysikov B.A., Kaplyukhin A.A. *Gas-dynamic phenomena in mines*. Sevastopol: Veber; 2003. 284 p. (In Russ.)
6. Galushko V.T., Zorin A.N. *Rock outbursts in mine workings of the Donbass mines*. Kiev: Naukova dumka; 1972. 168 p. (In Russ.)
7. Zykov V.S., Filatov Yu.M., Ivanov V.V. Low-pressure hydraulic impact on the coal massif and the purpose of its application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;377:012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012050>
8. Sokolov M.V., Prostov S.M., Zykov V.S. The study of stress-strain state of stabilized layered soil foundations. *E3S Web of Conferences*. 2017;15:01015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171501015>
9. Petukhov I.M., Linkov A.M. *Mechanics of rock bursts and bumps*. Moscow: Nedra; 1983. 279 p. (In Russ.)
10. Stavrogin A.N., Protosenya A.G. *Mechanics of rock deformation and disintegration*. Moscow: Nedra; 1992. 223 p. (In Russ.)
11. Coates D.F., Parsons R.C. Experimental criteria for classification of rock substances. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1966;3(3):181–189. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(66\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(66)90022-2)
12. Hucka V., Das B. Brittleness determination of rocks by different methods. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1974;11(10):389–392. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91109-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91109-7)
13. Kidybiński A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1981;18(4):295–304. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)91194-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)91194-3)
14. Andreev G.E. *Brittle failure of rock materials: Test results and constitutive models*. Rotterdam: A.A. Balkema; 1995. 456 p.
15. He C., Okubo S., Nishimatsu Y. A study of the class II behaviour of rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1990;23(4):261–273. <https://doi.org/10.1007/BF01043307>

16. Tarasov B.G. Universal scale of brittleness for rocks failed at compression. In: *Proceedings of the 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne, 9–13 May 2011*. Vol. 1. Sydney; 2011, pp. 669–673.
17. Murashev V.I., Fedchenko Yu.A. *Sudden coal and gas outbursts and rock bumps in Russian mines*. Kemerovo: RIPK; 2001. 61 p. (In Russ.)
18. Murashev V.I. Mechanism of unleashing sudden coal and gas outbursts in mine workings. In: *Fundamentals of the theory of sudden coal, rock and gas outbursts* [a collection of scientific works]. Moscow: Nedra; 1978, pp. 141–162. (In Russ.)
19. Zykov V.S., Ivanov V.V. Conditions for a start of sudden coal and gas outbursts in the breakage faces of coal mines. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;823(1):012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/823/1/012024>
20. Zykov V.S., Filatov Yu.M. Hazardous manifestation of gas-dynamic phenomena in the faces of coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;206(1): 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012047>
21. Zykov V.S., Lebedev A.V., Surkov A.V. *Prevention of gas-dynamic phenomena during excavation of coal seams*. Kemerovo: VostNII; 2010. 262 p. (In Russ.)
22. Zykov V.S., Lee H.U. About possibilities to improve current outburst hazard prediction based on updated mechanism of coal and gas outburst. *Mining Report*. 2016;152(2):161–170. Available at: https://mining-report.de/wp-content/uploads/2016/03/MiRe_1602_Gasausbruch_Zykow_160317.pdf
23. Zykov V.S. *Man-induced geodynamics*. Kemerovo: Kuzbass State State Technical University; 2006. 266 p. (In Russ.)
24. Zykov V.S., Slavolyubov V.S., Trusov S.E. Gas electromagnetic method for ongoing prediction of outburst-prone zones. In: *Safety of coal mining companies* [a collection of scientific works], Kemerovo: VostNII; 2000, pp. 36–43. (In Russ.)
25. Proskuryakov V.M., Shabarov A.N., Frid V.I. Express assessment of bump- and outbursts-prone coal seams. *Ugol'*. 1990;(3):58–59. (In Russ.)
26. Yakovlev D.V., Mulyov S.N. Experience of Angel-M multipurpose geophysical equipment use in coal industry and ore mining. *Ugol'*. 2014;(10):14–19. (In Russ.)
27. Yakovlev D.V., Mulev S.N., Tsirel S.V., Maksimov A.S., Mazya M.D., Bondarev A.V., Badanin A.I. *Method for determining rock mass bump hazard by electromagnetic emission, and device for its implementation*. Patent for Invention No.2535329. Published: 10.12.2014. (In Russ.) Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2535329C1_20141210.pdf

Информация об авторах

Зыков Виктор Семёнович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация

Тайлаков Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: oleg2579@gmail.com

Вьюников Александр Анатольевич – заместитель главного инженера – руководитель службы ППДЯ рудника «Интернациональный», Мирнинско-Нюрбинский ГОК АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

Ворожцов Сергей Геннадьевич – заместитель руководителя службы ППДЯ рудника «Интернациональный», Мирнинско-Нюрбинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация

Information about the authors

Viktor S. Zykov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Associate, Research Centre for Industrial and Environmental Safety in the Mining Sector, Kemerovo, Russian Federation

Oleg V. Tailakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director General, Research Centre for Industrial and Environmental Safety in the Mining Sector, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: oleg2579@gmail.com

Aleksandr A. Vyunikov – Deputy Chief Engineer, Head of Forecasting and Dynamic Event Prevention Service of the Internationalny Mine, Mirny-Nyurba Mining and Processing Division of ALROSA, Mirnyi, Russian Federation

Sergey G. Vorozhtsov – Deputy Head of Forecasting and Dynamic Event Prevention Service of the Internationalny Mine, Mirny-Nyurba Mining and Processing Division of ALROSA, Mirnyi, Russian Federation

Article info

Received: 14.02.2023

Revised: 27.03.2023

Accepted: 02.04.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.02.2023

Поступила после рецензирования: 27.03.2023

Принята к публикации: 02.04.2023