



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>


УДК 622.4:622.8



Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах

С. В. Баловцев   

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

 balovcev@yandex.ru

Аннотация

Оценка и управление аэрологическими рисками аварий в угольных шахтах основываются на создании информационно-аналитической системы данных, включающей в себя проектные значения показателей разных уровней и подсистем угольных шахт, эксплуатационные значения показателей, отслеживаемых системой мониторинга в реальном времени с использованием различных датчиков и устройств. В настоящем исследовании представлена методология мониторинга аэрологических рисков. На основании горно-геологических и горнотехнических условий отработки пластов, статистических данных по элементам вентиляционных и дегазационных систем угольных шахт приведены результаты оценки аэрологических рисков по отдельным уровням функциональной структуры угольных шахт, а также по отдельным факторам риска. По уровням аэрологических рисков выполнено ранжирование восьми угольных шахт. Установлено, что минимальное значение аэрологического риска I ранга составляет 0,0769, максимальное – 0,5698. Наименьшие значения аэрологического риска II ранга (0,1135–0,3873) относятся к шахтам II категории. Минимальное значение аэрологического риска III ранга составляет 0,057, максимальное – 0,595. Ранжирование угольных шахт по уровням аэрологических рисков позволяет выявить шахты с низким уровнем аэрологической безопасности и для каждой шахты определить направления технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Ключевые слова

угольная шахта, информационно-аналитическая система, аэрологическая безопасность, мониторинг аэрологических рисков, уязвимость схем и способов вентиляции

Для цитирования

Balovtsev S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):350–359. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>


SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines

S. V. Balovtsev   

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 balovcev@yandex.ru

Abstract

The assessment and management of aerological risks in coal mine accidents are based on the development of a data analytics system that hosts design values for various parameters and subsystems related to coal mines, as well as the real-time monitoring of operational parameters through various sensors and devices. This study presents the methodology for monitoring aerological risks. It utilizes mining, geological, and geotechnical conditions for seam extraction, along with statistical data concerning elements of coal mine ventilation and gas drainage systems, to assess aerological risks at individual coal mine functionality levels and individual risk factors. Eight coal mines have been ranked according to their aerological risk level. For rank I, the minimum aerological risk is 0.0769, while the maximum is 0.5698. Rank II is associated with category II mines. Aerological risk for this rank is the lowest and ranges from 0.1135 to 0.3873. In the case of rank III, the minimum aerological risk is 0.057, with a maximum of 0.595. This ranking of coal mines by aerological risk level allows to identify potentially unsafe mines in terms of aerology, and enables us to determine aerological risk mitigation measures (technical, technological, and organizational) for each mine to enhance aerological safety.

**Keywords**

coal mine, data analytics system, aerological system, aerological risk monitoring, vulnerability of ventilation schemes and types

For citation

Balovtsev S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):350–359. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>

Введение

Тенденции к интенсификации горного производства и увеличению объемов угля подземным способом в усложняющихся горно-геологических и горнотехнических условиях требуют более пристального внимания и системного подхода к вопросам обеспечения промышленной безопасности, одним из основных компонентов которой является аэрологическая безопасность.

Отказы, возникающие при функционировании системы аэрологической безопасности, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием различных факторов: колебанием интенсивности газовыделений из разрабатываемого пласта, выработанного пространства, нестационарностью газодинамических процессов [1, 2]; колебаниями расхода воздуха, непланируемыми изменениями сопротивления выработок, отказами вентиляционных сооружений [3, 4]; колебанием значений параметров горно-геологических и горнотехнических условий, изменением физико-технических свойств разрабатываемых пластов (газоносности, газопроницаемости, газоотдачи, коллекторских, фильтрационных свойств, пылеобразующей способности), геологическими нарушениями и т.д. [5, 6]. Поэтому при исследовании закономерности возникновения отказов системы аэрологической безопасности отдельные вышеуказанные параметры рассматриваются в большей части как непрерывные случайные величины, а не дискретные, которые могут принимать любые неизвестные заранее значения из рассматриваемого диапазона значений.

Нестационарность динамических процессов (газо-пыле-тепловыделений) в шахтах является первопричиной потери работоспособности системы управления аэрологической безопасностью, так как изменения горно-геологических и горнотехнических условий разработки угольных пластов могут привести к опасности возникновения взрывов и вспышек пылегазовых смесей, пожарам, горным ударам, самовозгоранию углей и другим видам аварий [7, 8].

Свойства и состояние угольных пластов и вмещающих пород определяют источники и места проявления газовыделения, пылеобразования, внезапных выбросов угля, пород и газа, самовозгорания угля, горных ударов [9, 10]. Поэтому тщательное изучение закономерностей, происходящих в угленосной толще явлений, составляет основу для принятия технических решений в рамках системы обеспечения аэрологической безопасности. Эффективность технических решений напрямую зависит от достоверности и оперативности информации о состоянии параметров многих технологических процессов [11, 12]. Знание закономерностей позволит установить весомость эффективности направлений мероприятий систе-

мы обеспечения аэрологической безопасности. Например, при отработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли, мероприятия по дегазации (заблаговременной, предварительной, пластовой) выходят на первый план [13, 14]. Также важны вопросы, касающиеся порядка отработки пластов в свите, затем следуют вопросы выбора схем вентиляции, специального проветривания с использованием газоотсасывающих установок и др. [15, 16].

На больших глубинах отработки угольных пластов возрастает интенсивность сближения кровли и почвы и, следовательно, возрастает роль аэродинамического старения выработок и его влияние на эффективность системы обеспечения аэрологической безопасности [17, 18].

Важная роль в системе обеспечения аэрологической безопасности отводится системе управления газовыделением, под которой понимается комплекс мероприятий по перераспределению газовыделения или изменению его величины. Целью управления газовыделением является облегчение вентиляции выработок, повышение эффективности вентиляции выемочных участков, подготовительных выработок и шахты в целом.

Управление газовыделением осуществляется проведением следующих основных мероприятий: изменение схем вентиляции; изменение аэродинамического сопротивления выработок с помощью вентиляционных сооружений и устройств; применение соответствующего порядка отработки пластов в свите и систем разработки; применение специального проветривания выработанного пространства, использование газоотсасывающих установок; применение дегазации выработок и пластов, газодренажных выработок и скважин и др. Для изучения процессов взаимодействия и механизма самовозгорания газа и угля в выработанном пространстве угольных лав могут быть применимы методы численного моделирования риска взрыва газа в выработанном пространстве [19, 20].

Методология мониторинга аэрологических рисков

Оценку эффективности функционирования системы аэрологической безопасности можно осуществить через оценку аэрологических рисков, охватывающих разные уровни и подсистемы угольных шахт, т.е. риски I, II и III рангов, риски загазирования, риски при повторном использовании выработок, риски влияния тяжелых углеводородов, обобщенный и прогнозный показатели риска и др. (табл. 1). Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах на основе имеющейся информации можно реализовать с помощью методов предиктивной аналитики.



На основе собранной, обработанной и структурированной информации можно с помощью методов предиктивной аналитики разработать сценарии о дальнейшем развитии интересующих нас событий. Поэтому первый вопрос, который возникает в этой связи, касается поиска, затем обработки информации и далее – разработки сценариев и интерпретации полученных результатов для выбора управленческих решений в системе обеспечения аэрологической безопасности.

Процесс сбора информации имеет разные уровни сложности сам по себе и зависит от степени вовлеченности в этот процесс человека, ручной труд которого до сих пор имеет низкую надежность и высокий риск ошибок [21, 22]. Для повышения надежности полученных решений используются ансамблевые подходы, характеризующиеся сопоставлением базовых индивидуальных решений [23, 24].

Различают четыре вида аналитики данных:

1. Описательная – сбор информации в течение всего времени наблюдения за объектом. Собранная информация анализируется, она должна помочь ответить на вопрос «Что произошло?». Для угольных шахт методами описательной аналитики можно осуществлять сбор информации по: авариям в угольных шахтах, их причинам, ущербу; горно-геологическим и горнотехническим условиям, при которых произошла авария, расследованию причин аварий и др. [25, 26].

2. Диагностическая – диагноз причин, из-за которых произошло исследуемое событие, с помощью статистических методов анализа. Все собранные данные могут быть разбиты на отдельные группы и подгруппы, производится анализ корреляции данных, выявляются значимые факторы, влияющие на результативное событие. В рамках диагностической аналитики могут быть сформированы группы статистических данных по характеристикам пластов, маркам углей, глубине ведения горных работ, метаноносности пластов, опасности шахт по пыли, нагрузке на очистной забой, абсолютной метанообильности шахт, скорости подвигания очистного забоя, схемам и способам вентиляции шахт и выемочных участков, характеристикам вентиляторов главного и местного проветривания и др.

3. Предиктивная – на основе предварительно обработанной информации, полученной с помощью методов описательной и диагностической аналитики, прогнозируют дальнейшее развитие событий. Так, например, изучив показатели старения выработок, методами предиктивной аналитики можно определить момент времени, когда в выработке должен быть произведен предупредительный ремонт, что снизит аэрологические риски в системе функционирования шахтных вентиляционных систем [4, 27].

4. Аналитика, позволяющая понять и обосновать те меры, которые надо предпринять для недопущения нежелательного события. Назовем ее предпри-

Таблица 1

Эксплуатационные показатели аэрологических рисков

Ранги аэрологических рисков	Эксплуатационные показатели аэрологических рисков	Примечание
I ранг	Аэрологический риск I ранга $R_{аш}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, схемы и способа вентиляции шахты, уязвимости вентиляторов главного проветривания
II ранг	Аэрологический риск II ранга $R_{акш}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, схемы и способа вентиляции крыла шахты, уязвимости вентиляционных сооружений
III ранг	Аэрологический риск III ранга R_a	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости выемочного участка
	Аэрологический риск аварий $R_{тув}$ на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	Зависит от содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), метаноносности угольных пластов, удельного пылевыведения, глубины ведения горных работ и уязвимости выемочного участка по технологическим факторам
	Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска $Q_{пр}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости выемочного участка, учитывает склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение дегазации, газоотсасывающих установок и газодренажного штрека
	Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$	Учитывает среднестатистические данные интенсивности отказов в выработках и схему проветривания выемочного участка
	Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$ при повторном использовании выработки, сут ⁻¹	Учитывает среднестатистические данные интенсивности отказов в выработках и схему проветривания выемочного участка, а также повторное использование выработки
	Аэрологический риск аварий в подготовительных выработках R_a	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости подготовительных выработок
	Аэрологический риск аварий $R_{туп}$ в подготовительных выработках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	Зависит от содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), метаноносности угольных пластов, удельного пылевыведения, глубины ведения горных работ и уязвимости подготовительной выработки по технологическим факторам
Прогнозный показатель аэрологического риска в подготовительных выработках $Q_{пр}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости подготовительных выработок, учитывает склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение дегазации	



сывающей аналитикой. В нашем случае с системой обеспечения аэрологической безопасности в первую очередь – это технические решения, направленные на управление свойствами и состоянием угольных пластов (параметры предварительного увлажнения; заблаговременной, предварительной, пластовой дегазации; технические показатели систем противоаварийной защиты и т.д.), во вторую очередь – это мероприятия технико-технологического характера.

Таким образом, при оценке эффективности системы мониторинга аэрологических рисков необхо-

дим представительный объем статистических данных как по элементам вентиляционной системы (главные вентиляторы, газоотсасывающие установки, вентиляторы местного проветривания, вентиляционные двери и шлюзы, кроссинги, главные воздухоподающие и вентиляционные стволы, лавы, откаточные и вентиляционные штреки, газоотсасывающие трубопроводы, средства автоматики и др.), так и по горнотехническим условиям (производительность лавы, мощность пласта, крепость пород, способ охраны выработок, глубина разработки, система разработки и др.) (табл. 2).

Таблица 2

Факторы аэрологических рисков

Факторы аэрологических рисков	№ угольной шахты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Категория шахты по газу	Сверх-категорная	Сверх-категорная	II категория	II категория	II категория	Сверх-категорная	Сверх-категорная	Сверх-категорная
Склонность пластов к горным ударам	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Склонность пластов к самовозгоранию	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Нет
Опасность по пыли	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Марки углей	Г	Г, ГЖ	Д, ДГ	Д	Д, ДГ	Д, ДГ	Д, ДГ	Г
Метаносность угольных пластов, м ³ /т	10–15	13–15 17–20	4–6 4–9		0–5	0–5 0–6	10–15	14–20
Глубина ведения горных работ, м	130–480	420–660	400	400	240–290	540	350–440	540
Депрессия шахты, даПа	292	820	290	220	295	265	306	320
Устойчивость проветривания шахты	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости
Схема проветривания шахты	Комбинированная	Фланговая	Комбинированная	Фланговая	Комбинированная	Комбинированная	Комбинированная	Комбинированная
Способ проветривания шахты	Нагнетательный	Комбинированный	Комбинированный	Комбинированный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Комбинированный
Степень устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания	Малая степень уязвимости	Большая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Большая степень уязвимости	Большая степень уязвимости
Обеспеченность шахты воздухом	1,33	1,47	1,2	1,17	1,27	1,13	1,05	1,46
Внешние утечки воздуха (расчетные), %	13,14	13,45	14	14	10	10		12,9
Внешние утечки воздуха (фактические), %	16,69	8,43	11	9,8	5	6	5,77	12,9
Устойчивость проветривания крыла шахты	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости
Схема проветривания крыла шахты	Центрально-двоянная	Фланговая	Центрально-двоянная	Фланговая	Центрально-двоянная	Центрально-двоянная	Центрально-двоянная	Центрально-двоянная
Способ проветривания крыла шахты	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный
Степень влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания	Малая степень уязвимости	Большая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости
Нагрузка на очистной забой, т/сут	6300	13500	13300	10900	7500	13400	20900	6600
Абсолютная метанообильность шахты, м ³ /мин	109	239	28,34	32	17	16,6	181	108
Скорость подвигания очистного забоя, м/сут	7	7 9,5	9 9,5	5	7,2	5,2	8,3	5,73
Длина лавы, м	230	365 365	300 300	350	300	410	400	300
Длина выемочного столба, м	1960	2100 2550	2850 2800	2850	2500	2300	3000	2100
Наличие дегазации	Нет	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да
Количество очистных забоев	1	2	2	1	1	1	1	1



Результаты исследований

В табл. 3 представлены результаты расчетов аэрологического риска всех трех рангов (I – для шахты в целом, II – для крыла шахты, III – для выемочных участков и подготовительных выработок). Для выемочных участков дополнительно рассчитаны риск загазирования участка в зависимости от схемы его вентиляции, риск загазирования участка при повторном использовании выработки, риск аварий на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов (в зависимости от марок углей), а также обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска (с учетом применения дегазации пластов). При расчетах принята максимальная глубина ведения горных работ. Необходимо отметить, что при установлении прогнозного значения риска учтена склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам; для шахт № 2 и № 8 коэффициент эффективности дегазации составил 0,95 и 0,9 соответственно, для остальных шахт принят средний коэффициент эффективности дегазации 0,6.

Для подготовительных выработок рассчитаны риск аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов, и прогнозный показатель аэрологи-

ческого риска с учетом применения мероприятий по дегазации пласта.

Из восьми анализируемых шахт 3 шахты относятся ко II категории метановой опасности и 5 – к сверхкатегорным. Анализ данных табл. 3 показывает, что наименьшее значение аэрологического риска I ранга составляет 0,0769, максимальное – 0,5698, что в 7,4 раза больше минимального значения риска. Минимальные значения риска относятся к шахтам II категории: шахты № 3, № 4, № 5, что соответствует малой степени риска (нормальному уровню безопасности: значение риска не более 0,15).

Для сверхкатегорных шахт наблюдается большой разброс в степенях риска, и расчеты показывают, что две шахты оцениваются умеренной степенью риска: шахты № 1 и № 6 (пониженный уровень безопасности: значение риска свыше 0,15, но не более 0,3); две шахты оцениваются большой степенью риска: шахты № 7 и № 8 (неудовлетворительный уровень безопасности: значение риска свыше 0,3, но не более 0,5) и на одной шахте (2) значение риска соответствует созданию чрезвычайной ситуации, приводящей к возникновению аварии (значение риска свыше 0,5).

Таблица 3

Результаты расчета аэрологических рисков

Значения аэрологических рисков	№ угольной шахты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Аэрологический риск I ранга $R_{a\text{ш}}$	0,2074	0,5698	0,0974	0,0769	0,1159	0,2134	0,3831	0,3532
Аэрологический риск II ранга $R_{a\text{кш}}$	0,2457–0,6931	0,2125–0,6166	0,1373–0,3873	0,1135–0,3322	0,1373–0,3873	0,2457–0,6931	0,2457–0,6931	0,2457–0,6931
Аэрологический риск III ранга R_a	0,425	0,272; 0,272	0,3325; 0,3325	0,057	0,3325	0,595	0,595	0,255
Аэрологический риск аварий $R_{тув}$ на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	0,5464–0,9255	0,5551–0,94; 0,5813–0,9846	0,3026–0,6548	0,2858–0,7317	0,2385–0,5297	0,2628–0,5547	0,5372–0,9256	0,5551–0,94
Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска $Q_{пр}$	0,4675	0,2346; 0,2346	0,3358; 0,3358	0,0576	0,3857	0,6902	0,6009	0,2231
Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$	0,189	0,065 0,065	0,189 0,189	0,097	0,189	0,189	0,189	0,097
Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$ при повторном использовании выработки, сут ⁻¹	0,2403	0,1244 0,1244	0,2403 0,2403	0,155	0,2403	0,2403	0,2403	0,1244
Аэрологический риск аварий в подготовительных выработках R_a	0,17–0,85	0,17–0,85	0,095–0,475	0,095–0,475	0,095–0,475	0,17–0,85	0,17–0,85	0,17–0,85
Аэрологический риск аварий $R_{тул}$ в подготовительных выработках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	0,0696–0,9846	0,0696–0,9846	0,0454–0,8185	0,0454–0,9692	0,0432–0,7996	0,0476–0,8373	0,0675–0,9692	0,0696–0,9846
Прогнозный показатель аэрологического риска в подготовительных выработках $Q_{пр}$	0,187–0,935	0,1466–0,7331	0,096–0,4798	0,096–0,4798	0,1102–0,551	0,1972–0,986	0,1717–0,8585	0,1488–0,7438



Анализируя горно-геологические и горнотехнические факторы (табл. 2), можно сделать вывод, что на риски I ранга в меньшей степени влияют схема и способ проветривания шахты, обеспеченность шахты воздухом, внешние и внутренние утечки воздуха, а в большей степени – абсолютная метанообильность шахты и депрессия вентиляторов главного проветривания. Для шахты № 8 эти значения составили 239 м³/мин и 820 даПа. Количество вентиляционных сооружений для этой шахты было наибольшим по сравнению с остальными шахтами (190).

В расчетных значениях аэрологического риска II ранга указан диапазон его значений для наилучших условий (малой депрессии откаточного и вентиляционного штреков, устойчивости проветривания крыла шахты, малой степени влияния тепловой депрессии наклонных выработок, малых степеней влияния способа вентиляции на загазирование выработок при аварийной остановке вентилятора главного проветривания, вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания) и наихудших, когда перечисленные ранее в скобках факторы имеют большую степень влияния на уязвимость схем, способов, вентиляционных сооружений крыльев шахты. Наименьшие значения аэрологического риска II ранга относятся к шахтам II категории и в 1,78 раз меньше как для лучших условий, так и для худших.

Наименьшее значение аэрологического риска III ранга составляет 0,057, максимальное – 0,595, что в 10,4 раза больше минимального значения риска. Минимальные значения риска относятся к шахте II категории (шахта № 4), что соответствует малой степени риска.

Две шахты оцениваются умеренной степенью риска: шахты № 2 и № 8; две шахты оценивают-

ся большой степенью риска: шахты № 1 и № 5. И на двух шахтах (№ 6 и № 7) значение риска соответствует созданию чрезвычайной ситуации, приводящей к возникновению аварии, так как проветривание выемочных участков на этих шахтах осуществляется по возвратноточной схеме проветривания с частичным разбавлением вредностей по источникам выделения. Схема проветривания шахт № 6 и № 7 осложняется наличием в ней диагонального соединения, в котором при определенных условиях может случиться опрокидывание струи воздуха.

Аэрологические риски аварий на выемочных участках, обусловленные содержанием тяжелых углеводородов в остаточных газах углей, возникают при отработке пластов марок Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС с большой нагрузкой на очистной забой при высокой скорости подвигания очистного забоя. Наибольшее значение риска аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов, получено для шахты № 2, разрабатывающей пласт марки ГЖ [28].

Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска учитывает дополнительные виды опасностей, такие как склонность угольных пластов к горным ударам и самовозгоранию, а также мероприятия по управлению газовыделением, такие как дегазация, использование газодренажных выработок, газоотсасывающих установок. В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий значение обобщенного показателя риска может увеличиваться или уменьшаться. Для всех шахт значение этого показателя незначительно увеличилось, кроме шахт № 2 и № 8, разрабатывающих пласты, не склонные к самовозгоранию.

По данным табл. 3 построены гистограммы по пяти видам рисков для исследуемых шахт (рис. 1).

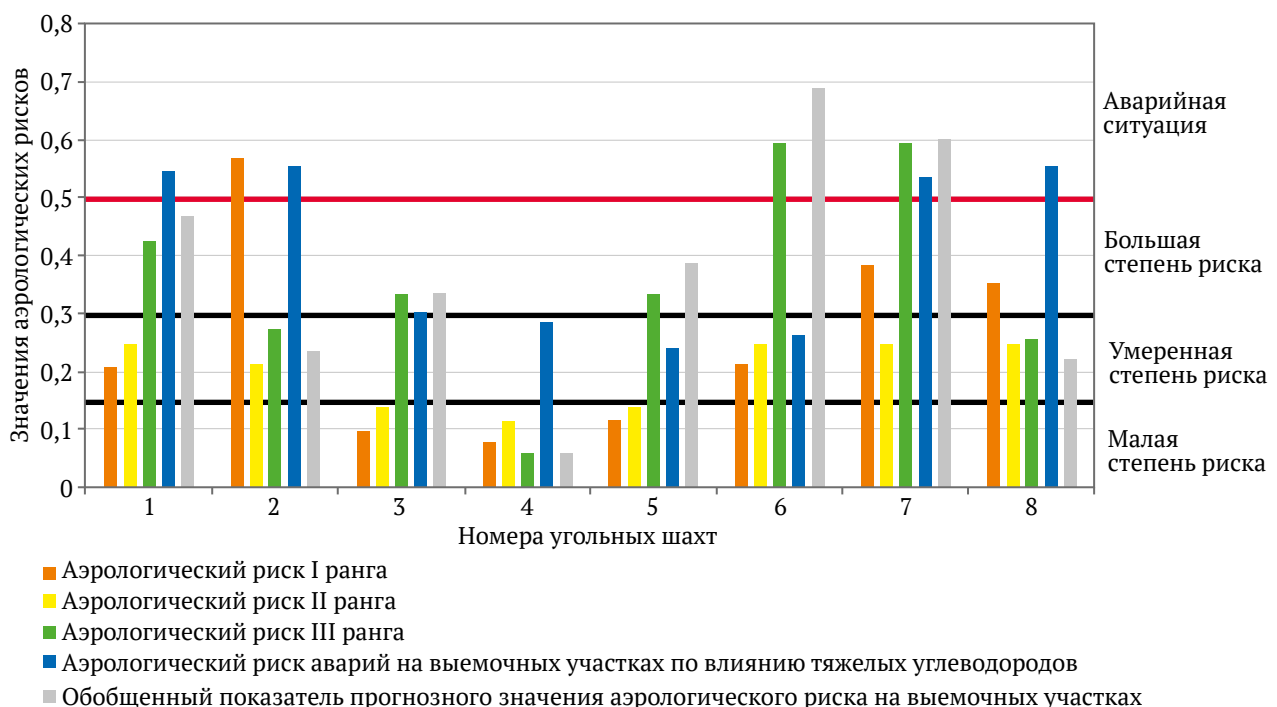


Рис. 1. Сравнительная оценка аэрологических рисков для угольных шахт



Из анализа данных следует, что аэрологические риски трех шахт (№ 3, № 4, № 5) характеризуются малыми значениями и находятся в диапазоне нормального уровня безопасности. Незначительно выходят из этого диапазона риски выемочных участков этих шахт, имеющих возвратноточные схемы проветривания с наличием в них диагональных соединений, но из-за небольшой абсолютной газообильности участков (от 17 до 28, 4 м³/т) эти риски большой опасности не представляют. В целом, для этих трех шахт характерна малая степень аэрологических рисков.

Оставшиеся пять шахт являются сверхкатегорными, и все пять попадают в зону больших рисков в первую очередь как шахты, разрабатывающие пласты, содержащие тяжелые углеводороды в остаточных газах углей, склонных к самовозгоранию и горным ударам. Эти риски накладываются на уязвимость схем вентиляции, не обеспечивающих полное разбавление вредностей по источникам их выделения (шахты № 6, № 7). Для шахты № 2 риски выемочных участков небольшие, но зато риски высшего ранга находятся в области аварийной работы шахты, что требует незамедлительных технических решений в отношении схемы вентиляции шахты. Самый низкий уровень аэрологических рисков (умеренная степень) всех рангов характерен для шахт № 8 и № 1, что соответствует пониженному уровню безопасности, требующему мониторинга горно-геологических и горнотехнических параметров, составляющих систему аэрологической безопасности шахт.

Заключение

Информационно-аналитическая система угольных шахт является основополагающей для оценки аэрологических рисков и архитектуры аэрологической безопасности. В информационную базу должны входить как проектные значения различных показателей подсистем угольных шахт, так и эксплуатационные значения таких показателей, отслеживаемых системой их мониторинга в реальном времени с использованием различных датчиков и устройств [29, 30]. Аналитическим инструментом обеспечения аэрологической безопасности может являться оценка аэрологических рисков по отдельным уровням функциональной структуры угольных шахт, а также по отдельным факторам риска, таким как риск загазирования участка, риск загазирования при повторном использовании выработок, риск влияния тяжелых углеводородов и др.

Завершающим этапом оценки аэрологических рисков является расчет их прогнозных значений с учетом применения технических и технологических мероприятий по устранению выявленных негативных факторов или снижению их воздействий, а также с учетом угрожающих факторов, таких как горные удары, самовозгорание угля и др. Ранжирование угольных шахт по уровням аэрологических рисков позволяет выявить шахты с низким уровнем аэрологической безопасности и для каждой шахты определить направления технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Список литературы

1. Тарасенко И.А., Куликова А.А., Ковалева А.М. К вопросу оценки автоматизации контроля параметров метановоздушной смеси. *Уголь*. 2022;(11):84–88. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88>
2. Martirosyan A.V., Ilyushin Yu.V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines. *Energies*. 2022;15(23):8917. <https://doi.org/10.3390/en15238917>
3. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V. et al. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023;6(3):95. <https://doi.org/10.3390/fire6030095>
4. Скопинцева О.В. Профилактический ремонт горных выработок как метод предупреждения отказов системы управления газовыделением. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2–1):54–63. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-54-63>
5. Kobylkin S.S., Pugach A.S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>
6. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н. Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(3):461–467. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467>
7. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I. et al. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 981, Information Technologies, Automation Engineering and Digitization of Agriculture*. 2022;981(3):032024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032024>
8. Кобылкин А.С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6–1):65–73. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73>
9. Gao L., Kang X., Tang M. et al. Study on prediction of outburst risk of excavation face by initial gas emission. *Geofluids*. 2022;2022:4866805. <https://doi.org/10.1155/2022/4866805>
10. Корнев А.В., Спицын А.А., Коршунов Г.И., Баженова В.А. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции. *Гор-*



ный информационно-аналитический бюллетень. 2023;(3):133–149. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_133

11. Kim M.L., Pevzner L.D., Temkin I.O. Development of automatic system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) motion control for mine conditions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):203–210. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-203-210>

12. Zhu Z., Wang H., Zhou J. Monitoring and control model for coal mine gas and coal dust. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020;56:504–515. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01161-3>

13. Tyuleneva T., Kabanov E., Moldazhanov M., Plotnikov E. Improving the professional risk management system for methane and coal dust explosions using a risk-based approach. In: *E3S Web of Conferences. The Second Interregional Conference “Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2021)”*. 2021;278:01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127801027>

14. Li F., He X., Zhang Yu. et al. Superposition risk assessment of the working position of gas explosions in chinese coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;167:274–283. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.017>

15. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):60–69. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05>

16. Álvarez-Fernández M.-I., Prendes-Gero M.-B., Peñas-Espinosa J.-C., González-Nicieza C. Innovative techniques in underground mining for the prevention of gas dynamic phenomena. *Energies*. 2021;14(16):5205. <https://doi.org/10.3390/en14165205>

17. Куликова Е.Ю., Конюхов Д.С. Мониторинг риска аварий при освоении подземного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):97–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97

18. Mitra S., Kumar D., Chaulya S. K., Kumar Ch. Prediction of strata monitoring system in underground coal mines using IoT. *Journal of the Geological Society of India*. 2022;98:232–236. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-1963-8>

19. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007>

20. Feng X., Ai Z., Zhang X. et al. Numerical investigation of the evolution of gas and coal spontaneously burned composite disaster in the goaf of steeply inclined coal seam. *Sustainability*. 2023;15(12):9246. <https://doi.org/10.3390/su15129246>

21. Tang C., Gao E., Li Y. et al. Inspection robot and wall surface detection method for coal mine wind shaft. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5662. <https://doi.org/10.3390/app13095662>

22. Niu L., Zhao J., Yang J. Risk assessment of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on HFACS-GE and Bayesian networks. *Processes*. 2023;11(2):554. <https://doi.org/10.3390/pr11020554>

23. Wang G., Ren H., Zhao G. et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00491-3>

24. Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S., Nelyub V.A. et al. A study on a probabilistic method for designing artificial neural networks for the formation of intelligent technology assemblies with high variability. *Electronics*. 2023;12(1):215. <https://doi.org/10.3390/electronics12010215>

25. Shareef Sk.Kh., Kumar B.A., Suwarna G., Swathi M. Coal miners safety monitoring system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019;8(12):3202–3204. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3246.1081219>

26. Tripathi A.K., Aruna M., Prasad S. et al. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology. *Instrumentation Measure Métrologie*. 2023;22(1):29–34. <https://doi.org/10.18280/i2m.220104>

27. Diaz J., Agioutantis Z., Hristopulos D. T. et al. Forecasting of methane gas in underground coal mines: univariate versus multivariate time series modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023;37(12):2099–2115. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02382-8>

28. Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(6):109–115. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2132>

29. Yang J., Zhao J., Shao L. Risk assessment of coal mine gas explosion based on fault tree analysis and fuzzy polymorphic Bayesian network: a case study of Wangzhuang Coal Mine. *Processes*. 2023;11(9):2619. <https://doi.org/10.3390/pr11092619>

30. Srivalli Dr.G., Ujwala S.V., Sahithi G. et al. Study on coal mine safety monitoring and alerting system using IOT. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS)*. 2023;11(6):3781–3786. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54194>



References

1. Tarasenko I.A., Kulikova A.A., Kovaleva A.M. On the issue of assessing the automation of control of the parameters of the methane-air mixture. *Ugol'*. 2022;(11):84–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88>
2. Martirosyan A.V., Ilyushin Yu.V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines. *Energies*. 2022;15(23):8917. <https://doi.org/10.3390/en15238917>
3. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V. et al. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023;6(3):95. <https://doi.org/10.3390/fire6030095>
4. Skopintseva O.V. Preventive repair of mining works as a method for preventing failures in the gas control system. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2–1):54–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-54-63>
5. Kobytkin S.S., Pugach A.S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>
6. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N. Analysis and comprehensive evaluation of gas-dynamic processes in coal mines using the methods of the theory of probability and math statistics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(3):461–467. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467>
7. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I. et al. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 981, Information Technologies, Automation Engineering and Digitization of Agriculture*. 2022;981(3):032024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032024>
8. Kobytkin A.S. Dust distribution at a coal shearer in the face area. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6–1):65–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73>
9. Gao L., Kang X., Tang M. et al. Study on prediction of outburst risk of excavation face by initial gas emission. *Geofluids*. 2022;2022:4866805. <https://doi.org/10.1155/2022/4866805>
10. Kornev A.V., Spitsyn A.A., Korshunov G.I., Bazhenova V.A. Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(3):133–149. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_133
11. Kim M.L., Pevzner L.D., Temkin I.O. Development of automatic system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) motion control for mine conditions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):203–210. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-203-210>
12. Zhu Z., Wang H., Zhou J. Monitoring and control model for coal mine gas and coal dust. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020;56:504–515. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01161-3>
13. Tyuleneva T., Kabanov E., Moldazhanov M., Plotnikov E. Improving the professional risk management system for methane and coal dust explosions using a risk-based approach. In: *E3S Web of Conferences. The Second Interregional Conference “Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2021)”*. 2021;278:01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127801027>
14. Li F., He X., Zhang Yu. et al. Superposition risk assessment of the working position of gas explosions in chinese coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;167:274–283. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.017>
15. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):60–69. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05>
16. Álvarez-Fernández M.-I., Prendes-Gero M.-B., Peñas-Espinosa J.-C., González-Nicieza C. Innovative techniques in underground mining for the prevention of gas dynamic phenomena. *Energies*. 2021;14(16):5205. <https://doi.org/10.3390/en14165205>
17. Kulikova E. Yu., Konyukhov D.S. Accident risk monitoring in underground space development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):97–103. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97
18. Mitra S., Kumar D., Chaulya S. K., Kumar Ch. Prediction of strata monitoring system in underground coal mines using IoT. *Journal of the Geological Society of India*. 2022;98:232–236. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-1963-8>
19. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007>
20. Feng X., Ai Z., Zhang X. et al. Numerical investigation of the evolution of gas and coal spontaneously burned composite disaster in the goaf of steeply inclined coal seam. *Sustainability*. 2023;15(12):9246. <https://doi.org/10.3390/su15129246>



21. Tang C., Gao E., Li Y. et al. Inspection robot and wall surface detection method for coal mine wind shaft. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5662. <https://doi.org/10.3390/app13095662>
22. Niu L., Zhao J., Yang J. Risk assessment of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on HFACS-GE and Bayesian networks. *Processes*. 2023;11(2):554. <https://doi.org/10.3390/pr11020554>
23. Wang G., Ren H., Zhao G. et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00491-3>
24. Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S., Nelyub V.A. et al. A study on a probabilistic method for designing artificial neural networks for the formation of intelligent technology assemblies with high variability. *Electronics*. 2023;12(1):215. <https://doi.org/10.3390/electronics12010215>
25. Shareef Sk.Kh., Kumar B.A., Suwarna G., Swathi M. Coal miners safety monitoring system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019;8(12):3202–3204. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3246.1081219>
26. Tripathi A.K., Aruna M., Prasad S. et al. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology. *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2023;22(1):29–34. <https://doi.org/10.18280/i2m.220104>
27. Diaz J., Agioutantis Z., Hristopoulos D.T. et al. Forecasting of methane gas in underground coal mines: univariate versus multivariate time series modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023;37(12):2099–2115. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02382-8>
28. Ganova S.D., Skopintseva O.V., Isaev O.N. On the issue of studying the composition of hydrocarbon gases of coals and dust to predict their potential hazard. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(6):109–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2132>
29. Yang J., Zhao J., Shao L. Risk assessment of coal mine gas explosion based on fault tree analysis and fuzzy polymorphic Bayesian network: a case study of Wangzhuang Coal Mine. *Processes*. 2023;11(9):2619. <https://doi.org/10.3390/pr11092619>
30. Srivalli Dr.G., Ujwala S.V., Sahithi G. et al. Study on coal mine safety monitoring and alerting system using IOT. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS)*. 2023;11(6):3781–3786. <https://doi.org/10.22214/ijras.2023.54194>

Информация об авторе

Сергей Владимирович Баловцев – кандидат технических наук, доцент, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0961-6050](https://orcid.org/0000-0002-0961-6050), Scopus ID [56780405300](https://scopus.com/authorid/56780405300); e-mail balovcev@yandex.ru

Information about the author

Sergey V. Balovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0961-6050](https://orcid.org/0000-0002-0961-6050), Scopus ID [56780405300](https://scopus.com/authorid/56780405300); e-mail balovcev@yandex.ru

Поступила в редакцию	09.10.2023	Received	09.10.2023
Поступила после рецензирования	23.10.2023	Revised	23.10.2023
Принята к публикации	25.10.2023	Accepted	25.10.2023