

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ОБСТАНОВКИ РУДНИКОВ

О.С. Паршаков¹, А.В. Зайцев¹, Е.А. Нестеров¹, С.С. Андрейко¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: olegparshakov@gmail.com

Аннотация: Представлен подход к комплексному исследованию газовой обстановки подземных рудников. Приводится описание предлагаемой методики проведения экспериментальных и лабораторных исследований в условиях подземных горных выработок. Экспериментальные исследования включают проведение общерудничной газовой съемки, локальные измерения газовыделений от работы самоходного дизельного оборудования, от производства взрывных работ, измерения газовыделений от отбитой горной массы в местах ее складирования, замеры газовыделений горючих газов из шпуров/скважин подземного бурения, а также отбор образцов горных пород в шахтных условиях. В задачи лабораторных исследований входят определение газового состава проб рудничного воздуха, исследование газоносности горных пород по связанным газам, проведение хроматографического анализа компонентного состава свободных и связанных газов отобранных образцов горных пород. Данные натуральных и лабораторных исследований, полученные в условиях рудников, рекомендуется использовать для параметризации моделей вентиляционных сетей и выполнения дальнейшего математического моделирования переноса газозадушной смеси в системе выработок. На основе предложенного комплексного подхода к изучению газовой обстановки действующих рудников стало возможным повысить качество и практическую ценность разработки заключения о составе, масштабе, местах и характере выделения газов в подземных рудниках.

Ключевые слова: рудник, газовая обстановка, газоносность пород, экспериментальные исследования, лабораторные исследования, вентиляционная сеть, концентрация газа, газовыделения.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номера проектов: 121111800053-1, 122012000396-6).

Для цитирования: Паршаков О. С., Зайцев А. В., Нестеров Е. А., Андрейко С. С. Комплексное исследование газовой обстановки рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 5–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_5.

Integrated research of gas environment in mines

O.S. Parshakov¹, A.V. Zaitsev¹, E.A. Nesterov¹, S.S. Andreyko¹

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: olegparshakov@gmail.com

Abstract: The article presents an approach to the integrated research of the gas environment in underground mines. The lab-scale testing and field research procedures are described. The field research includes mine gas survey, local measurement of gas emission of self-propelling

diesel machines, gas emission measurement in blasting and at storages of broken rocks, combustion gas emission measurement in underground boreholes, as well as in situ sampling. The lab-scale tests determine gas composition of mine air samples, analyze content of occluded gases in rocks, and analyze chromatography of free and occluded gases in rock samples. It is recommended to use both the field and lab test data in parametrization of ventilation network models and in the mathematical modeling of gas-air mixture flow in underground roadways. The proposed integrated approach to the gas environment investigation in operating mines can help improve the quality and practical value of the reports on composition, scale, location and nature of gas emissions in underground mines.

Key words: mine, gas environment, gas content of rocks, field research, lab-scale testing, ventilation network, gas concentration, gas emission.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Contract No. 075-03-2021-374 dated 29 December 2020 (Project Nos. 121111800053-1, 122012000396-6).

For citation: Parshakov O. S., Zaitsev A. V., Nesterov E. A., Andreyko S. S. Integrated research of gas environment in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):5-29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_5.

Введение

Анализ имеющейся горно-геологической информации о разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых свидетельствует о том, что практически все горные породы в той или иной степени газоносны [1–3]. Газоносность пород определяет газообильность подземных рудников по взрывоопасным газам и имеет важное значение с точки зрения безопасности ведения горных работ [4, 5]. Согласно ФНиП № 505 «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», шахты, на которых обнаружено (или по геологическим данным прогнозируется) выделение горючих или ядовитых газов, должны иметь заключение научной организации о составе, масштабе, местах и характере выделения газов и паров. В результате повсеместное наличие горючих газов в породном массиве, а также ежегодное возрастание интенсивности ведения горных работ в пределах существующих горных отводов указывают на актуальность разработки

заключений о составе, масштабе, местах и характере выделения газов и паров для условий действующих рудников.

Однако кроме наличия природных источников газовой выделений технологические процессы добычи полезных ископаемых сопровождаются выделением в рудничную атмосферу различных техногенных вредных газов, образующихся от работы самоходного дизельного оборудования (СДО), производства взрывных и других работ [6–9]. При этом с точки зрения негативного влияния газов на здоровье подземных рабочих изучение источников техногенных газовой выделений может носить более значимый характер. Особый интерес изучение техногенных газовой выделений приобретает в подземных рудниках, в которых имеется повышенная концентрация горючих работ (большое количество действующих забоев) с учетом использования мощного и высокопроизводительного СДО и применения буровзрывного способа добычи. Необходимо добавить, что ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и пере-

работке твердых полезных ископаемых» и «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» (№ 494) предъявляют ряд требований к контролю выхлопных газов от СДО и газообразных продуктов взрыва соответственно, но эти требования не позволяют сформировать целостную картину о характере, масштабах и взаимном влиянии всех имеющихся источников газовой выделений в подземных выработках на параметры рудничной атмосферы.

С учетом вышесказанного в целях определения состава, характера и мощности как природных, так и техногенных источников газовой выделений в действующих рудниках, а также оценки их влияния на параметры рудничной атмосферы рекомендуется придерживаться комплексного подхода при изучении газовых обстановок подземных выработок. Предлагаемый подход предусматривает комплексный анализ, включающий:

- определение всех потенциальных источников газовой выделений в подземных выработках рудника;
- исследование мощности выделения газов и компонентного состава для отдельных типов источников;
- исследование газоносности горных пород;

Таблица 1

Геологическая приуроченность разрабатываемых рудных тел
Geological characteristics of the ore deposits being developed

Месторождение	Рудник	Тип геологической приуроченности рудных тел	Природная газоносность по горючим газам, м ³ /м ³		Абсолютная метанообильность, м ³ /сут*
			угленосные отложения	девонские отложения	
Октябрьское	Рудник № 1	5 – девонский	12,4	4,3	191,2
	Рудник № 2				74,4
Талнахское	Рудник № 3	3 – нижнетунгусский	12,4	2,7	247,2
	Рудник № 4	5 – девонский			124,7
	Рудник № 5	2 – среднетунгусский			3,2

* Абсолютная метанообильность приведена на состояние 2020 г.

- анализ распределения газов в подземных выработках при помощи модели вентиляционной сети рудника.

В результате в настоящей работе авторами приводится рекомендуемый объем исследований газовой обстановки и порядок их проведения на примере действующих подземных рудников. На основе комплексного исследования и его наиболее значимых обобщенных результатов сделаны выводы о безопасности производства технологических процессов в условиях рудников с последующей выдачей заключений о составе, масштабе и характере газовой выделений.

Краткие сведения о рассматриваемых рудниках

Рассматриваются крупные подземные рудники, разрабатывающие медно-никелевые месторождения. Детальное описание геологии месторождений имеются во многих работах [10]. В пределах шахтных полей рудников выделяются три промышленных типа медно-никелевых руд – богатые (сплошные), вкрапленные в интрузии и медистые (прожилково-вкрапленные во вмещающих интрузив породах).

Шахтные поля с позиции оценки источников газовой выделений подразделяются на пять типов геологической приуро-

ченности рудных тел [11]. Геологическая приуроченность рудных тел отдельных рудников и газоносность горных пород представлена в табл. 1. Из соображений конфиденциальности рудникам вместо реальных наименований присвоены порядковые номера.

Подготовка рудных запасов к очистной выемке осуществляется посредством сети транспортных штреков, уклонов, разведочных и слоевых ортов, панельных уклонов, рудоспусков, вентиляционных и вентиляционно-ходовых восстающих. На рудниках применяется система разработки с полной закладкой выработанного пространства, порядок отработки сплошной слоевой и камерный. Очистные и проходческие работы ведутся буровзрывным способом. Доставка руды и породы осуществляется самоходным дизельным оборудованием. Откатка руды и породы — электровозным транспортом. Схема проветривания всех исследуемых рудников — фланговая, способ проветривания — всасывающий.

Количество рабочих зон, в которых работает СДО и выполняются взрывные работы в течение рабочей смены для отдельного рудника, представлено в табл. 2. Необходимо добавить, что от количества рабочих зон напрямую зависит тре-

буемое количество воздуха для проветривания рудника.

Свежий воздух подается в рудники по центрально расположенным клетевым, скиповым и вспомогательным стволам, выдается — по размещенным на флангах шахтных полей вентиляционным стволам за счет работы вентиляторов главного проветривания. Отметим, что применение всасывающего способа проветривания способствует глубокой дегазации породного массива.

Методика исследования газовой обстановки рудников и газоносности пород

Газовый состав рудничной атмосферы важен с точки зрения обеспечения нормальных санитарно-гигиенических и безопасных условий труда горнорабочих [12, 13]. Газовый состав зависит от ряда факторов (техногенных и природных источников загрязнения):

- газоносности горных пород;
- газодинамических характеристик горных пород;
- способа отбойки горных пород;
- параметров производства взрывных работ;
- применения горных машин и оборудования.

Для определения влияния потенциальных источников на изменение состава рудничного воздуха проводятся экспериментальные и лабораторные исследования. Полный объем исследований и их направленность представлены в табл. 3.

Ниже представлено краткое описание методики проведения экспериментальных и лабораторных исследований на примере действующих рудников.

Проведение общерудничной газовой съемки

Газовая съемка предусматривала проведение замеров параметров проветривания и газораспределения в вентиляци-

Таблица 2

Количество рабочих зон с СДО и забоев Number of working areas with use of internal combustion engine machines and faces

Рудник	Количество рабочих зон	
	с использованием самоходного дизельного оборудования	с производством взрывных работ
Рудник № 1	31	46
Рудник № 2	34	41
Рудник № 3	33	44
Рудник № 4	30	17
Рудник № 5	21	23

Таблица 3

Объем исследований газовой обстановки рудников
The scope of studies of the gas distribution in underground mines

Метод исследования	Перечень работ	Направленность	Основная задача
Экспериментальный	Проведение общерудничной газовой съемки	Оценка суммарного влияния на газовый состав рудничной атмосферы всех возможных источников газовыделений	Определение состава и содержания в рудничном воздухе главных капитальных выработок ядовитых и горючих газов
	Измерение газовыделений от работы СДО	Изучение влияния техногенных источников газовыделений	Определение состава и содержания в рудничном воздухе как рабочих зон, так и главных вентиляционных выработок ядовитых газов
	Замеры газовыделений от производства взрывных работ		
	Измерение газовыделений от отбитой горной массы	Изучение влияния природных и техногенных газовыделений	Определение состава и содержания в рудничном воздухе в местах складирования горной массы ядовитых и горючих газов
	Замеры газовыделений горючих газов из шпуров и скважин подземного бурения	Изучение влияния природных газовыделений	Определение состава свободных газов в горных породах и их газодинамических характеристик
Лабораторный	Определение газового состава проб рудничного воздуха	Уточнение газового состава рудничной атмосферы	Определение состава и содержания в рудничном воздухе ядовитых и горючих газов в контрольных местах отбора проб
	Определение газоносности горных пород по связанным газам	Изучение влияния природных источников газовыделений	Определение состава и содержания в горных породах ядовитых и горючих газов
	Проведение хроматографического анализа компонентного состава свободных и связанных газов образцов пород		

онной сети рудников. Измерения проводились в главных воздухоподающих и вентиляционных выработках рудников, в капитальных выработках горных участков, а также в рабочих зонах в пределах проходческих и очистных выработок (рис. 1). В замерных пунктах выполнялись измерения сечений и скоростей дви-

жения воздуха согласно методикам («Проведение воздушно-депресссионных и газовых съемок, определение устойчивости проветривания горных выработок и проявления низкотемпературной эманации на объектах ведения горных работ», МЧС России) проводились замеры содержания газов в рудничном воздухе [14].

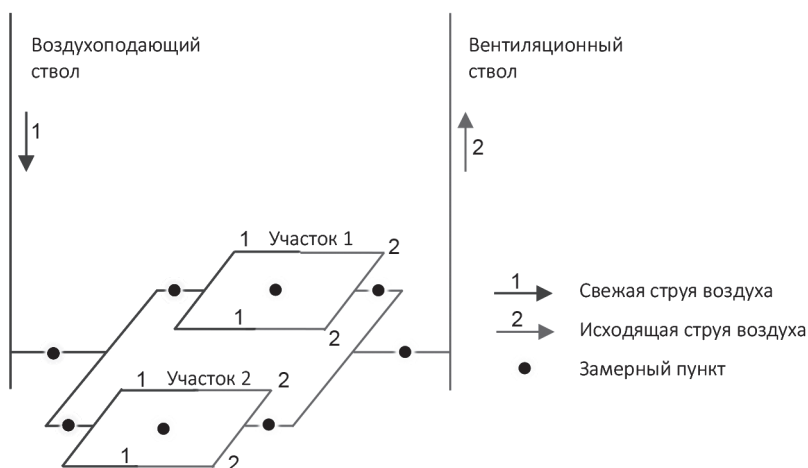


Рис. 1. Схематическое расположение замерных пунктов в подземном руднике при проведении газовой съемки

Fig. 1. schematic arrangement of measuring points in an underground mine during gas survey

Таблица 4

Перечень измеряемых газов и способ определения их концентрации

The list of measured gases and the method of determining their concentration

Наименование газа (паров)	Формула	Метод определения концентрации газа				
		экспресс-анализ				лабораторный
		Drager X-am 5600	Drager X-am 5000	ALTAIR 4X	Инд. трубки	хроматограф «Хромос-1000»
Кислород	O ₂	+	+	+	-	+
Диоксид углерода (углекислый газ)	CO ₂	+	+	-	+	+
Метан	CH ₄	+	+	+	-	+
Водород	H ₂	-	-	+	-	+
Оксид углерода (угарный газ)	CO	+	+	+	+	-
Оксид азота	NO	+	+	-	-	-
Диоксид азота	NO ₂	+	+	-	+	-
Оксид азота (в пересчете на NO ₂)	NO ₂	-	-	-	+	-
Диоксид серы (сернистый газ)	SO ₂	-	-	+	-	-
Сероводород	H ₂ S	-	+	+	+	-
Азот	N ₂	-	-	-	-	+
Акролеин	C ₃ H ₄ O	-	-	-	+	-
Формальдегид	CH ₂ O	-	-	-	+	-
Ртуть металлическая	Hg	-	-	-	+	-
Аммиак	NH ₃	-	-	-	+	-

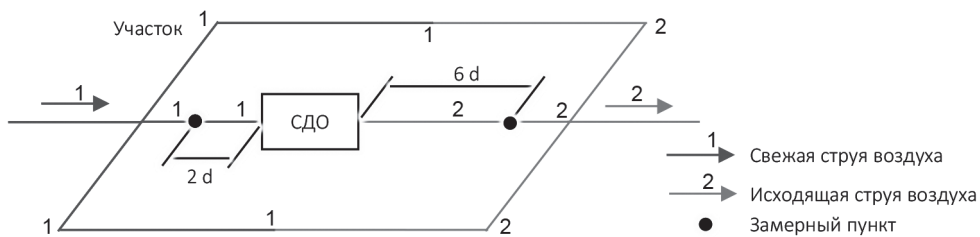


Рис. 2. Схематическое расположение замерных пунктов в сквозной выработке при измерении газовыделений от СДО

Fig. 2. Schematic arrangement of measuring points in the development when measuring gas emissions from cars with an internal combustion engine

Перечень газов и способ определения их концентрации приведен в табл. 4.

Газовая съемка рудничной атмосферы производилась преимущественно с использованием приборов экспресс-методов (индикаторные трубки и портативные газоанализаторы). Все инструменты и приборы экспресс-методов использовались согласно инструкциям производителей. Для верификации результатов экспресс-методов дополнительно производился отбор проб рудничного воздуха в целях определения концентраций газов посредством лабораторного анализа. Количественный анализ рудничного воздуха на содержание ядовитых и горючих газов проводился на газовом хроматографе в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009. Методики отбора проб воздуха и определения газового состава на хроматографе широко известны и детально описаны в работах [15, 16]. Кроме этого, результаты лабораторного анализа использовались для определения абсолютной газобильности рудников.

Измерение газовыделений от работы СДО

При проведении замеров газовыделений от работы СДО определялось содержание следующих выхлопных газов: оксида углерода (СО), оксидов азота (NO, NO₂). Замеры выполнялись в сквозной выработке длиной не менее 50 м. В выработке поддерживался постоянный рас-

ход воздуха при его скорости не более чем 2 м/с. Измерения в выработке предусматривали определение концентраций газов с учетом работы самоходной машины на холостом ходу и на максимальных оборотах двигателя. Замеры произведены на свежей струе воздуха на расстоянии не менее чем 2 эквивалентных диаметра сечения выработки от СДО и на исходящей струе воздуха на расстоянии не менее чем 6 эквивалентных диаметров от СДО (рис. 2).

В замерных пунктах при помощи портативных приборов фиксировались содержания СО, NO, NO₂, а также расход воздуха в выработке. Кроме этого, с помощью шприцов объемом 150 мл с зажимами производился отбор проб выхлопных газов СДО, в дальнейшем с помощью индикаторных трубок на поверхности производится измерение концентрации СО и суммы окислов азота NO_x в выхлопных газах [17]. Отбор проб осуществлялся непосредственно на выходе из выхлопной трубы путем введения трубки-насадки шприца в поток выхлопных газов на холостом ходу и на максимальных оборотах двигателя.

Измерение газовыделений после взрывных работ

При проведении измерений газовыделений после производства взрывных работ определялся объем выделяющихся ядовитых газов и время, необходимое

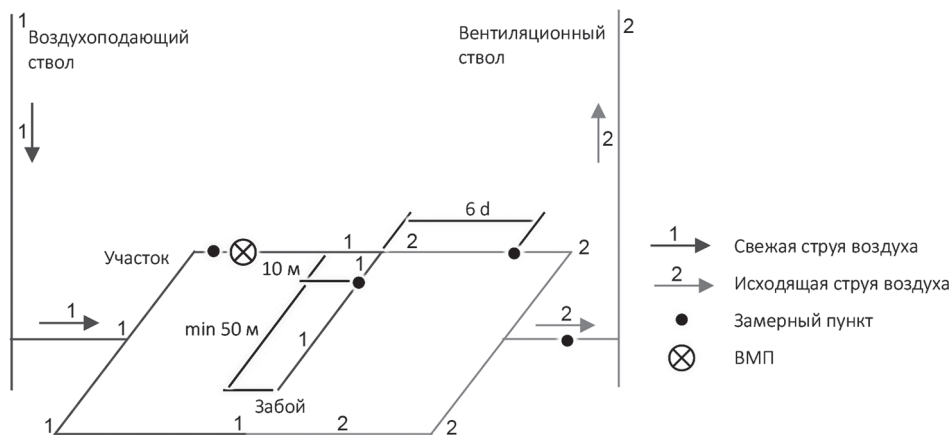


Рис. 3. Схематическое расположение замерных пунктов при измерении газовыделений от производства взрывных работ

Fig. 3. Schematic arrangement of measuring points when measuring gas emissions from blasting operations

для полного их выноса, как в отдельных забоях горных участков, так и в руднике в целом (рис. 3). Для исследования выбирались наиболее удаленные от вентиляционных стволов проходческие и очистные забои, в которых велись взрывные работы.

Перед производством взрывных работ в замерных пунктах выполнялись измерения параметров воздуха и устанавливались портативные газоанализаторы в режиме ежеминутной записи показаний. На основе обработки показаний газоанализатора определялось время, требуемое для достижения ПДК после взрывных работ. Газоанализаторы крепились за кровлю выработки и располагались в центре ее поперечного сечения. Для установления времени выноса продук-

тов взрыва из рудника в целом помимо измерений в проходческих и очистных забоях до начала проведения взрывных работ газоанализаторы устанавливались в капитальных вентиляционных выработках с основной исходящей струей воздуха вблизи вентиляционных стволов рудника. Количество замерных станций в капитальных вентиляционных выработках определялось с учетом актуального воздухораспределения в руднике.

Измерение газовыделений от отбитой горной массы в местах ее складирования

Для определения газовыделений от отбитой горной массы замеры выполнялись в выработке до места складирования пород/руды (на свежей струе воздуха)



Рис. 4. Схематическое расположение замерных пунктов в сквозной выработке при измерении газовыделений от отбитой горной массы

Fig. 4. Schematic arrangement of measuring points in the through-working when measuring gas emissions from the recaptured rock mass

и после (на исходящей струе воздуха). В замерных пунктах определялся расход воздуха, проводился анализ состава воздуха экспресс-методами и отбирались пробы воздуха для дальнейшего лабораторного анализа. Место складирования породы/руды должно находиться на участке проветриваемой сквозной выработки без сбоек с другими сквозными выработками (рис. 4).

Отбитая порода должна занимать не более 80% живого сечения выработки. Перед выполнением замеров устанавливалось время начала складирования породы/руды, а также средний размер кусков породы.

Изучение газодинамических характеристик пород и отбор проб горючих газов в исследовательских скважинах и шпурах

Изучение газоносности горных пород по свободным газам и их газодинамических характеристик заключалось в проведении инструментальных измерений газовыделений из шпуров и скважин, пробуренных в горных выработках, с одновременным отбором проб газа [16–18]. Исследования проводились в процессе бурения шпуров/скважин с последующей их герметизацией при помощи герметизирующего устройства (рис. 5). Герметизирующая часть состоит из спе-

циальной камеры, в которую при помощи насоса через клапан подается воздух, что позволяет загерметизировать шпур/скважину.

Газ, выделяющийся из стенок и забоя загерметизированной части шпура/скважины, поступал в газоотводящий штуцер, к которому подключался прецизионный портативный цифровой манометр. С помощью манометра измерялась начальная скорость газовыделения в шпуре/скважине по давлению, создаваемому газом, проходящим через откалиброванное отверстие капилляра, а также определялось приращение давления газов в скважине в течение 30 с после ее герметизации, то есть начальное газовое давление. По этой величине с помощью заранее построенных графиков зависимости $X = f(P_r)$, где X – газоносность пород, $\text{м}^3/\text{м}^3$; P_r – величина начального газового давления, Па, определялись показатели газоносности.

Функция зависимости газоносности пород по свободным газам от величины начального газового давления имеет следующий вид [19, 20]:

$$X = \frac{4,4 + 12,9 \cdot P_r}{71,94 \cdot P_r^{0,16}}. \quad (1)$$

Давление газа в массиве пород кровли рассчитывалось по известной формуле Лейбензона [21]:

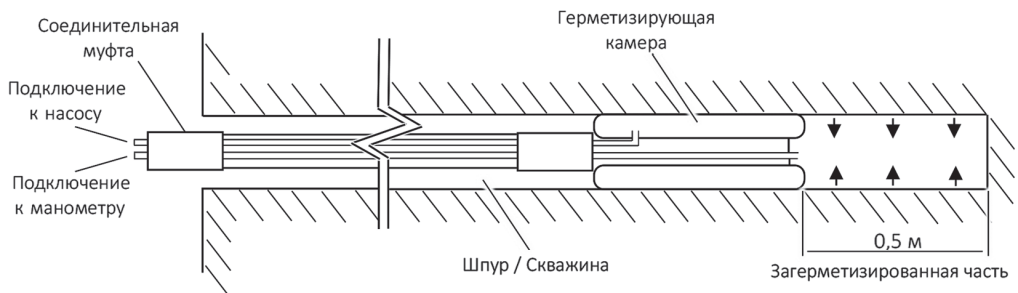


Рис. 5. Схема расположения герметизатора в шпуре/скважине при определении газодинамических характеристик и измерении газоносности пород по свободным газам

Fig. 5. The layout of the sealer in the hole / well when determining the gas dynamic characteristics and measuring the gas content of rocks by free gases

$$P_0 = \frac{P_\Gamma}{\left(\frac{2}{\mu + 1}\right)^{\frac{\mu}{\mu - 1}}}, \quad (2)$$

где μ — показатель адиабаты для смеси выделяющихся газов ($\mu = 1,4$).

После измерения давления газа производился отбор проб при помощи пластикового шприца объемом 150 мл. Химический анализ состава отобранных свободных газов проводился при помощи газового хроматографа.

Изучение газоносности горных пород по связанным газам

Для определения содержания связанных газов в подземных условиях отбирались пробы горных пород в виде керна. Для этого на основании анализа горно-геологических и горнотехнических условий первоначально устанавливались места отбора проб горных пород. Из геологоразведочных скважин отбирались по 3 образца каждой пересекаемой скважинной геологической разности. Масса отдельного образца составляла не менее 300 г. Отобранные образцы пород (керна) использовались для лабораторного анализа.

Методика определения газоносности пород по связанным газам заключалась в замерах объема выделившихся газов при сухой механической дезинтеграции (размол) образцов пород с постоянным контролем давления и температуры в изолированном от атмосферы сосуде, а также в отборе и хроматографическом анализе компонентного состава газов [22].

Объем выделившихся из измельченной породы газов определялся согласно следующему выражению:

$$V_\Gamma = V_B \cdot \frac{1 - P_0}{P_K - \alpha_t}, \quad (3)$$

где P_0 — давление газа в размольном стакане на момент начала измельчения породы, кПа; P_K — давление газа в размольном стакане в конце измельчения по-

роды, кПа; α_t — термический коэффициент давления газа, который показывает, на какую часть увеличивается начальное давление газа при нагревании на 1°C в постоянном объеме и рассчитывается согласно следующему выражению:

$$\alpha_t = \frac{P_0 \cdot (t_K + t_0)}{273}, \quad (4)$$

где t_0 — температура газа в размольном стакане на момент начала измельчения породы, $^\circ\text{C}$; t_K — температура газа в размольном стакане на конец измельчения породы, $^\circ\text{C}$; V_B — объем газа в размольном стакане, мл:

$$V_B = V_C - V_n, \quad (5)$$

где V_C — объем размольного стакана за вычетом объема мелющих шаров, мл; V_n — объем образца породы, рассчитывается, исходя из массы и объемного веса исследуемой породы, мл.

Газоносность пород по связанным газам рассчитывается по формуле

$$q = \frac{V_\Gamma}{V_n}. \quad (6)$$

После окончания размола образцов пород с помощью пробоотборника отбиралась проба выделившегося из породы газа, компонентный состав которого анализировался на газовом хроматографе. Анализ компонентного состава свободных и связанных газов, отобранных из горных пород, проводился в соответствии с ГОСТ 31371.7-2008 «Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности».

Приборная база

Для выполнения экспериментальных исследований газовой обстановки в подземных выработках рудников использовались следующие приборы:

- рудничные взрывозащищенные анемометры АПР-2 крыльчатого типа с автономным питанием, производитель НПФ «Экотехинвест»;

- лазерные дальномеры DISTO D, производитель Leica;
- прецизионные портативные цифровые барометры DPI-740, производитель Druck;
- термовлагомеры Fluke-971, производитель Fluke;
- газоанализаторы портативные X-am 5000, X-am 5600, производитель Drager;
- газоанализаторы портативные ALTAIR 4X, производитель MSA;
- аспираторы сильфонные AM-0059, производитель НПФ «СЕРВЭК»;
- индикаторные трубки, производитель НПФ «СЕРВЭК»;
- стеклянные газонепроницаемые сосуды и шприцы объемом не менее 150 мл для отбора проб рудничного воздуха.

Для выполнения лабораторных исследований компонентного состава газов, содержащихся в пробах рудничного воздуха, свободных и связанных газов, содержащихся в горных породах, использовались следующие приборы:

- хроматограф газовый «Хромос-1000»;
- хроматограф газовый 450-GC «Varian Inc»;
- щековая дробилка BB 51 «Retsch»;
- планетарная шаровая мельница PM 100 «Retsch» с размольным стаканом емкостью 500 мл;
- система измерения давления и температуры PM GrindControl «Retsch»;
- весы электронные настольные МК-15.2-A22.

Основные результаты исследования

Для представления широкого комплекса исследований результаты экспериментальных и лабораторных данных сведены в консолидированные таблицы. В таблицах на примере наиболее интересных результатов, полученных для отдельно взятых рудников, приводятся

экспериментальные замеры общерудничной газовой съемки, газовой выделений от работы самоходного оборудования, газовой выделений после выполнения взрывных работ, газовой выделений от отбитой горной массы, а также результаты лабораторного анализа проб газовой выделений из шпуров/скважин свободных газов и изучения газоносности образцов горных пород. Следует отметить, что обобщение выводов осуществляется на основании результатов исследований, полученных для всех рудников.

Результаты общерудничной газовой съемки

В табл. 5 приведены зафиксированные концентрации газов в воздухе в типовых выработках рудника № 4 при помощи экспресс-методов (индикаторными трубками и портативными газоанализаторами) и лабораторного анализа проб рудничного воздуха. Для ядовитых и горючих газов приведены максимальные значения концентраций.

Согласно результатам общерудничных газовых съемок, концентрация кислорода (O_2) в обследованных выработках всех рудников составляла не менее 20% по объему. Ядовитые газы (пары) акролеина, формальдегида, ртути и аммиака в подземных горных выработках обследованных рудников не обнаружены. В пределах допустимых значений находились концентрации следующих газов: метан (CH_4), водород (H_2), диоксид углерода (CO_2), оксид углерода (CO), сероводород (H_2S), диоксид азота (NO_2). При этом в пределах горных участков, где сконцентрированы горные работы, зафиксированы наибольшие концентрации вредных газов, кроме этого, зафиксированы превышения допустимых концентраций сернистого газа (SO_2) и окислов азота (NO_x). Превышения ПДК по сернистому газу обусловлены как окислительными процессами, происходящими

Таблица 5

Результаты общерудничной газовой съемки
Results of the afternoon gas survey

Тип выработок	Концентрации газов										
	O ₂	CO ₂	CH ₄	CO	NO	NO ₂	NO _x	SO ₂	H ₂ S	N ₂	H ₂
	%		ppm								
Рудник № 4											
Главные воздухоподающие выработки рудника	20,9*	0,03*	0*	0*	0*	0*	0**	0*	0*	78,09	1,35e-005
	20,85	0,038	22,5e-005	0*	0*	0*	0**	0*	0*	78,33	4,99e-005
Воздухоподающие выработки горного участка	20,9*	0,04*	0*	1,8*	0,8*	0,01*	1**	0,2*	0*	78,57	6,46e-005
	20,89	0,031	63,4e-005	4,0*	4,3*	0,27*	12**	8,8* 10**	1* <2**	78,04	6,13e-005
Рабочие зоны горных участков	20,8*	0,12*	0*	4,0*	4,3*	0,27*	8**	2,3*	0*	78,41	5,27e-005
	20,84	0,15** 0,151	167,9e-005	3,2*	2,9*	0,11*	5**	1,4*	0*	-*	0,5*
Вентиляционные выработки горных участков	20,8*	0,11*	0*	3,2*	2,9*	0,11*	8**	2,3*	0*	78,04	6,13e-005
	20,86	0,102	153,8e-005	2,0*	1,9*	0,04*	5**	1,4*	0*	78,41	5,27e-005
Главные вентиляционные выработки рудника	20,8*	0,07*	0*	2,0*	1,9*	0,04*	5**	1,4*	0*	78,41	5,27e-005
	20,87	0,03** 0,115	106,7e-005	17*	1,0*	1,0*	2,6*	3,8*	7,1*	-*	0,5*
Допустимые концентрации	20,0*	0,5*	0,5*	17*	-*	1,0*	2,6*	3,8*	7,1*	-*	0,5*

20,9* – концентрация газа, зафиксированная газоанализатором;

0,15** – концентрация газа, зафиксированная индикаторными трубками;

20,86 – концентрация газа, определенная при помощи лабораторного анализа;

8,8 – зафиксированная концентрация газа превышает ПДК

при разработке сульфидных руд [23], так и содержанием серы в используемом СДО дизельном топливе [24]. Превышения ПДК по окислам азота, вероятно, связаны с работой СДО и ненадлежащим проветриванием горных выработок, которое характеризуется подачей недостаточного количества воздуха в рабочие зоны. Следует отметить, что преимущественно в главных вентиляционных выработках рудников концентрации вредных газов ниже, чем в вентиляционных выработках горных участков — это объясняется разжижением газов за счет существующих внутренних утечек свежего воздуха. Также необходимо добавить, что содержание некоторых газов (в том числе метана) в рудничной атмосфере на несколько порядков ниже чувствительности экспресс-методов. Вместе с этим с учетом пределов измерения газоанализаторов и индикаторных трубок результаты экспресс-методов и результаты лабораторного анализа имеют достаточную сходимость.

Таким образом, анализ результатов газовых съемок указывает на наличие в обследованных рудниках как природных, так и техногенных источников газовой выделений, изучение которых требует более детальных исследований. При этом результаты общерудничных съемок позволили не только определить компонент-

ный состав и содержание газов в рудничном воздухе, но и выявить общие закономерности его изменения в процессе проветривания рудника.

При разработке месторождений одним из факторов, определяющих безопасные условия ведения горных работ, является газообильность выработок — количество газа, выделяющегося из горных пород в единицу времени (абсолютная), или отнесенного к единице добытого полезного ископаемого (относительная).

Таким образом, для оценки безопасности ведения горных работ в условиях выделения горючих газов на основе результатов лабораторного анализа проб рудничного воздуха рассчитана абсолютная газообильность рудников (см. табл. 6).

В соответствии с полученными результатами определения газообильности рудников установлено, что абсолютная газообильность рудников на много порядков ниже количества воздуха, подаваемого в подземные выработки. Аналогичные результаты получены для отдельных рабочих зон (выработок) рудников. Это свидетельствует о том, что объем выделяющихся природных горючих газов является незначительным и не оказывает влияния на безопасность ведения горных работ с точки зрения взрывоопасности рудничной атмосферы.

Таблица 6

Абсолютная газообильность рудников
Absolute gas content of mines

Газ	Расход воздуха, подаваемого в рудник, м ³ /с	Концентрация газа во входящей струе воздуха, %	Концентрация газа в исходящей струе воздуха, %	Газообильность, м ³ /сут
Рудник № 1				
CH ₄	1176,0	0,000173	0,000678	513,0
H ₂		0,000007	0,000018	11,0
Рудник № 4				
CH ₄	447,5	0,000450	0,000920	182,6
H ₂		0,000030	0,000250	83,5

*Результаты измерений
и моделирования газовойдыделений
от работы СДО*

В целях оценки влияния на газовую обстановку рудника самоходного дизельного оборудования в условиях отдельного рудника выполнены измерения количества выхлопных газов для всего перечня техники. Для примера в табл. 7 приведены параметры газовойдыделений от типового СДО (для двух рудников представлено по одной машине).

Результаты измерения газовойдыделений от СДО свидетельствуют о том, что выхлопные газы приводят к ухудшению газовой обстановки подземных выработок рудника. При этом в период замеров для большинства техники (80% парка используемого СДО) содержание ядовитых газов, выделяющихся в рудничную атмосферу, находилось в допустимых пределах. Для некоторых СДО в режиме максимальной рабочей нагруз-

ки (выполнение машиной погрузочных работ, транспортирование груза и т.д.) наблюдаются превышения допустимых концентраций по сумме окислов азота (NO_x) – это вызвано неисправностью выхлопных систем СДО.

Кроме этого, установлено, что зафиксированные превышения ПДК в пределах горных участков обусловлены недостатками вентиляции рудника, к которым относятся подача в рабочую зону малого количества воздуха, требуемого для разбавления отработанных выхлопных газов, и последовательное проветривание рабочих зон – исходящая струя воздуха из одной рабочей зоны попадает в другую.

Следует отметить, что помимо таких ядовитых газов, как CO , NO , NO_2 , при проведении замеров в выхлопных газах фиксировалась концентрация сернистого газа (SO_2), что объясняется содержанием серы в дизельном топливе [24].

Таблица 7

Результаты измерений газовойдыделений от работы СДО
Results of measurements of gas emissions from the operation of machines
with an internal combustion engine

Замерный пункт	Расход воздуха в выработке (расход воздуха на 1 л.с.)	Концентрация газов						
		O_2	CO_2	CO	NO	NO_2	NO_x	SO_2
		%		ppm				
Рудник № 3 / ПДМ Caterpillar R1700G								
Перед машиной	9,8 м ³ /с (1,6 м ³ /мин)	20,9	0,07	0	1,7	0	0	0
После машины		холостой ход						
		20,9	0,08	2	1,8	0,11	1,5	0
		максимальная рабочая нагрузка						
		20,9	0,15	3	3,9	0,23	3,5	0
Рудник № 4 / ПДМ Normet 850								
Перед машиной	15,8 м ³ /с (5,8 м ³ /мин)	20,9	0,04	0	0,13	0,03	0	0
После машины		холостой ход						
		20,9	0,05	2	0,67	0,04	0,5	0,1
		максимальная рабочая нагрузка						
		20,9	0,13	7	4,93	0,33	3,1	2,0
Допустимые концентрации		20,0	0,5	17	–	1,0	2,6	3,8

Для оценки газовой обстановки в рудниках в целом и выбора способов ее нормирования дополнительно использовался модуль теплогазодинамического расчета АК «АэроСеть» [25]. При помощи модуля произведен расчет сопряженной задачи распределения аэродинамических и газодинамических параметров рудничного воздуха с учетом задания в вентиляционной сети местных источников газовыделений. Для разработки газодинамических моделей рудников за основу приняты модели вентиляционных сетей с учетом фактического воздухо-распределения в рудниках. При разработке газодинамической модели количество и местоположение рабочих зон, в которых работает СДО, приняты согласно фактическому развитию горных

работ (см. табл. 2). Параметры газовой выделений от СДО приняты на основании результатов экспериментальных исследований (см. табл. 7). При этом для оценки наиболее пессимистичного случая допущено предположение, что все источники газовой выделений в виде СДО на протяжении всей рабочей смены работают с максимальными нагрузками на двигатель. Кроме этого, при моделировании не учитываются выделения горючих газов из массива горных пород ввиду незначительных их величин в сравнении с газовой выделением от СДО, о чем свидетельствуют результаты эксперимента (см. табл. 5).

Количество выхлопных газов от СДО ($\text{м}^3/\text{с}$) определено с учетом данных технического паспорта техники по формуле

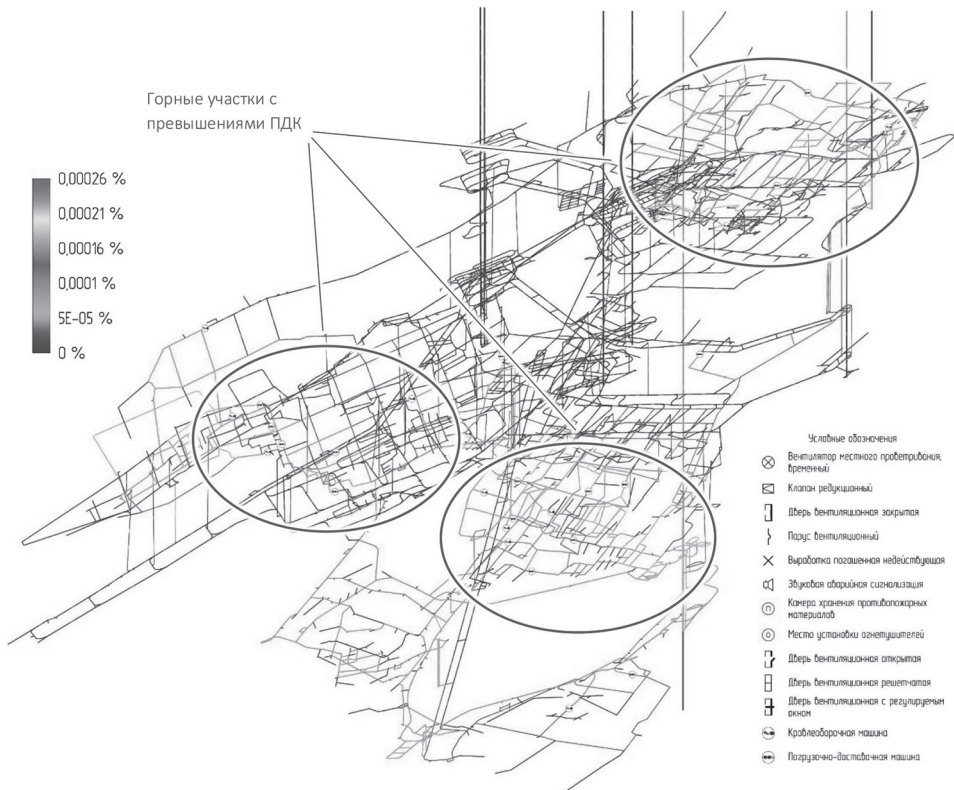


Рис. 6. Распределение концентраций оксида азота в течение рабочей смены в модели вентиляционной сети рудника

Fig. 6. Distribution of nitric oxide concentrations in the working shift in the mine ventilation network model

$$g_{\text{вых}} = \frac{V \cdot n}{2}, \quad (7)$$

где V — суммарный рабочий объем цилиндров, м³; n — скорость вращения коленчатого вала, об/с.

При моделировании газовой обстановки в руднике с учетом работы СДО прогнозировалось распространение как окислов азота в пересчете на NO₂, так и оксида углерода (СО). Пример визуального представления результатов моделирования газораспределения окислов азота для одного из рудников представлен на рис. 6.

Таким образом, на базе разработанных моделей, отражающих целостное представление газораспределения в вентиляционной сети отдельного рудника, возможно выработать технические решения, направленные на повышение эффективности проветривания рабочих зон при применении СДО.

Результаты измерений и моделирования газовой выделений от взрывных работ

Основные результаты экспериментального исследования газовой выделений от взрывных работ представлены в табл. 8. В условиях рассматриваемых рудников при производстве взрывных работ ис-

пользовались взрывчатые вещества аммонит 6-ЖВ, гранулит АС-7, АС-8, А6, их газовость согласно паспортам буровзрывных работ составляет 22 л/кг.

Результаты экспериментальных данных показали, что главным образом после выполнения взрывных работ в рудничную атмосферу выделяются окислы азота (NO_x) и оксид углерода (СО). Кроме этого, при выполнении взрывных работ в забоях, содержащих сульфидные руды, фиксировался сернистый газ (SO₂). При этом анализ динамики времени выноса ядовитых газов из рабочих зон подземных выработок показал, что наиболее длительное снижение концентраций до ПДК характерно для оксида углерода (СО). Также учитывая пределы измерений портативным газоанализатором окислов азота (NO_x), объем выделившихся газов после взрыва определялся только для оксида углерода.

На рис. 7 представлена динамика изменения концентраций газов после производства взрывных работ на примере проходческой выработки рудника № 1.

Следует отметить, что практически для всех обследованных тупиковых выработок, в которых производились взрывные работы, требуемое время проветривания превышало 60 мин. Это связано

Таблица 8

Результаты измерений газовой выделений от взрывных работ
Results of measurements of gas emissions from blasting operations

Тип выработки	Количество взрываемого ВВ, кг	Максимальные концентрации газов			Объем выделившегося СО, м ³	Период достижения допустимых концентраций по ядовитым газам, мин
		СО	NO	NO ₂		
ppm						
Рудник № 3						
Проходческая	220	1540	>200	>50	3,5	>120
Рудник № 4						
Проходческая	234	1100	>200	>50	4,0	> 60
Рудник № 5						
Проходческая	207	2000	>200	>50	3,4	>120

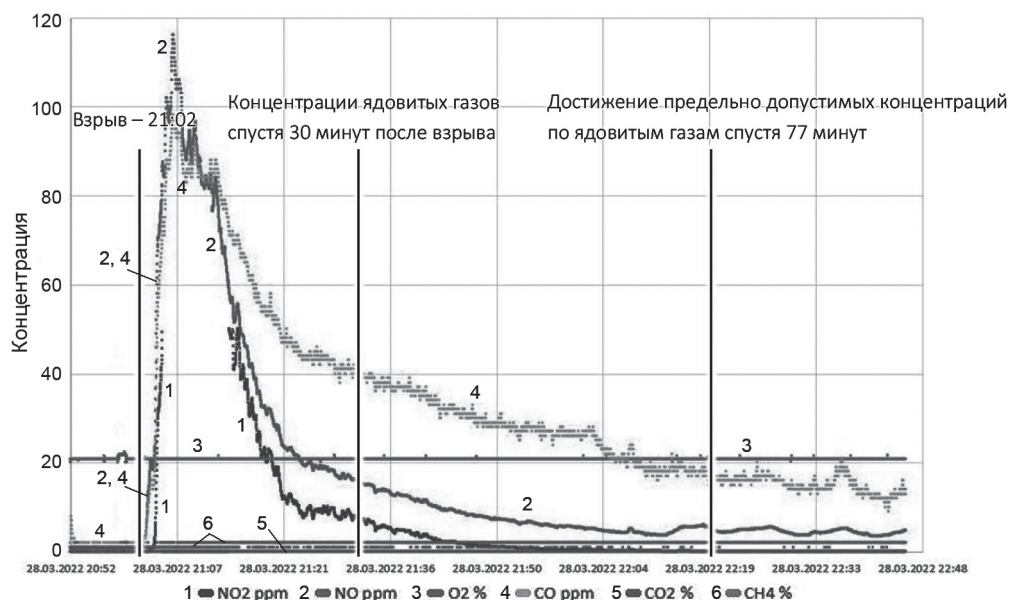


Рис. 7. Пример динамики концентрации ядовитых газов в устье проходческой выработки рудника № 1
 Fig. 7. An example of dynamics of the concentration of toxic gases in the mouth of underground mines no. 1

с тем, что на период проведения взрывных работ прекращалось проветривание тупиковых забоев за счет работы вентилятора местного проветривания (ВМП), при этом подача воздуха в забои осуществлялась только по трубопроводу со сжатым воздухом. Вследствие этого мероприятия в забое не обеспечивался расход воздуха, необходимого для выноса продуктов взрыва.

Отключение ВМП со стороны рудников обусловлено влиянием образующейся в момент взрыва ударной волны на сохранность гибкого вентиляционного трубопровода. Однако согласно п. 160 ФНиП «Правила безопасности при ведении и переработке твердых полезных ископаемых» действующие выработки должны непрерывно проветриваться активной струей воздуха. В итоге нарушения требований правил безопасности приводят к увеличению времени проветривания рабочих зон после взрывных работ, что является недопустимым для случая пересменки длительностью менее 60 мин.

Для оценки влияния взрывных работ на газовую обстановку рудников в целом дополнительно в АК «АэроСеть» [25] произведен аналогичный расчет сопряженной задачи распределения аэродинамических и газодинамических параметров рудничного воздуха. При разработке газодинамической модели количество и местоположение рабочих зон, в которых выполняются взрывные работы, приняты согласно фактическому положению ведения горных работ (см. табл. 2). Параметры газовыделений от взрывных работ приняты на основании результатов экспериментальных исследований (см. табл. 8). При этом для оценки наиболее пессимистичного случая допущено предположение, что количество газов, выделяющихся при выполнении взрывных работ, во всех забоях одинаково и достигает максимальных величин, зафиксированных в ходе полевых работ для условий отдельного рудника. Необходимо добавить, что моделирование газодинамических процессов в рудниках после взрыва (принимая во внимание

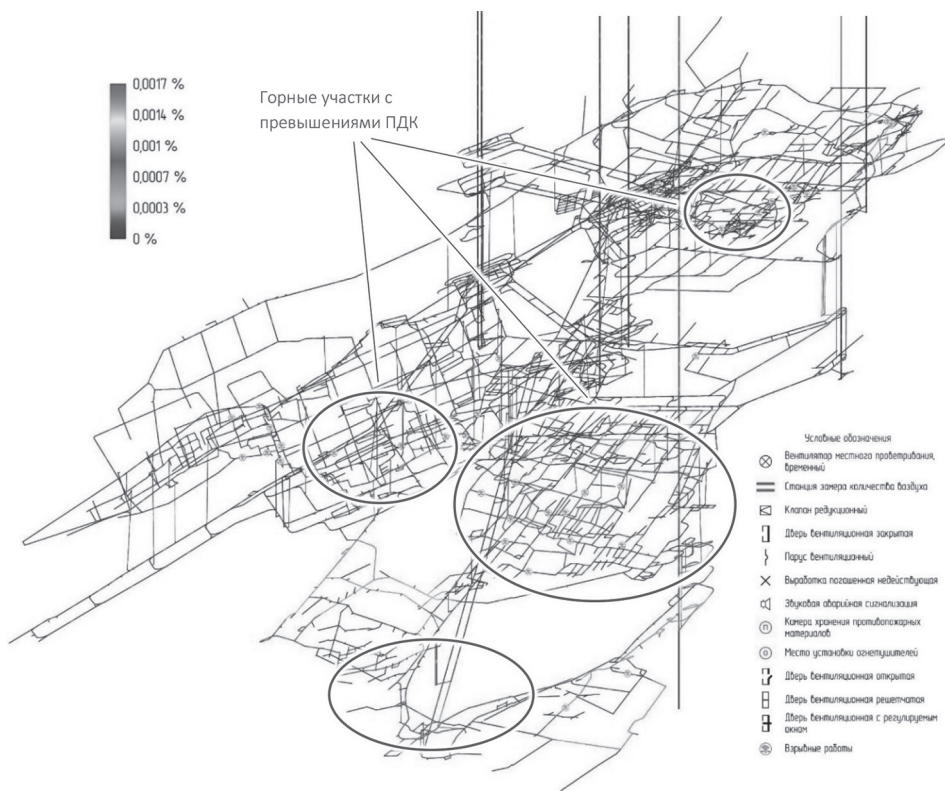


Рис. 8. Распределение концентраций оксида углерода спустя 30 мин после выполнения взрывных работ
Fig. 8. Distribution of carbon monoxide concentrations 30 minutes after blasting

наиболее длительное снижение концентрации оксида углерода (CO) до ПДК, а также сопоставимое время выноса прочих ядовитых и горючих газов) выполнялось с учетом выделения только оксида углерода. Кроме этого, при моделировании не учитываются выделения горючих газов из массива горных пород ввиду незначительных их величин в сравнении с газовыделениями от техники с ДВС, о чем свидетельствуют результаты эксперимента (см. табл. 5).

Количество оксида углерода (CO), выделяющегося при производстве взрывных работ (м³/мин), определено по формуле

$$Q_{CO} = V_{CO} / t_{пров}, \quad (8)$$

где V_{CO} — суммарный объем оксида углерода (CO), м³; $t_{пров}$ — время проветривания тупиковой выработки, мин.

Пример визуального представления результатов моделирования газораспределения оксида углерода после производства взрывных работ для одного из рассматриваемых рудников представлен на рис. 8.

На основании выполненного моделирования газораспределения в рудниках после производства взрывных работ установлено, что в значительной части подземных выработок спустя 30 мин после выполнения взрывных работ наблюдается превышение концентраций оксида углерода (CO) сверх допустимых значений (0,0017%).

Согласно результатам прогнозирования, снижение концентраций до ПДК при фактическом проветривании рабочих зон рудников происходит не ранее чем через 90 мин.

Таким образом, при помощи параметризованных моделей вентиляционных сетей рудников возможно целостно оценить газовую обстановку в подземных выработках после производства в них взрывных работ. Кроме этого, на основе моделей имеется возможность разработать мероприятия, направленные на повышение эффективности выноса вредных газов от взрывных работ.

Результаты измерений газовыделений от отбитой горной массы в места ее складирования

Согласно результатам выполненных измерений, газовыделения от отбитой горной массы в местах ее складирования практически отсутствуют. Концентрация кислорода составляла не менее 20% по объему.

Отсутствие влияния отбитой горной массы на газовую обстановку рудников обусловлено незначительными объемами (до 100 м³) горной массы и минимальным временем (не более 24 ч) ее складирования. Как правило, весь объем пустой породы и руды за последующую

рабочую смену после проведения буровзрывных работ транспортируется до дневной поверхности.

Результаты исследования газоносности

Результаты изучения газоносности пород включают шахтные измерения газоносности пород по свободным газам и лабораторные исследования газоносности образцов пород по связанным газам (рис. 9).

Экспериментальные исследования по определению газоносности и газодинамических характеристик пород по свободным газам выполнялись в действующих забоях горных выработок. Работы в забоях выполнялись параллельно с бурением шпуров под отбойку. В общей сложности пробурено 88 исследовательских шпуров и выполнено более 200 замеров газодинамических характеристик пород.

В целях изучения газоносности горных пород по связанным газам в шахтных условиях отобраны образцы пород, которые подвергались лабораторному

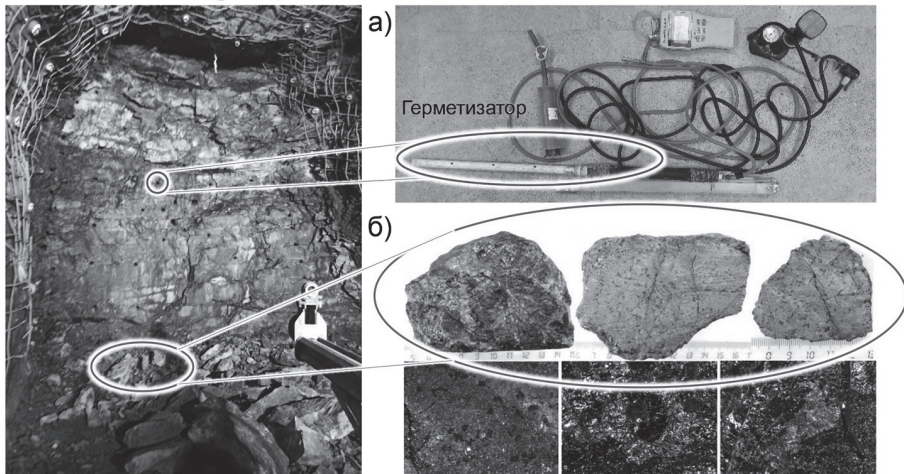


Рис. 9. Фотоснимок забоя проходческой выработки, в пределах которого проводились исследования газоносности пород по свободным газам (а) и отбор проб пород для определения содержания связанных газов (б)

Fig. 9. A photograph of the face of the tunneling workings, within which studies of the gas content of rocks were carried out using free gases (a) and sampling of rocks to determine the content of bound gases (b)

анализу. Для лабораторных исследований из действующих горных выработок отобраны 65 образцов пород.

В табл. 9 приведены краткие результаты по определению газоносности пород по свободным газам.

По результатам данных эксперимента и лабораторного анализа проб газа можно сделать выводы, что газоносность пород по свободным газам в выработках рудников имеет низкие значения. Максимальная газоносность пород достигает $0,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило $0,190 \text{ МПа}$ при начальной скорости газовой выделении $0,45 \text{ л/мин}$. Компонентный состав свободных газов следующий: метан (CH_4) изменяется от $0,03\%$ до $6,56\%$; водород (H_2) изменяется от $0,01\%$ до $0,39\%$; суммарное содержание тяжелых углеводородных газов ($\text{C}_2 - \text{C}_5$) изменяется от $0,04\%$ до $2,98\%$.

В табл. 10 приведены краткие результаты определения газоносности пород по связанным газам.

Таблица 9

Результаты газоносности пород по свободным газам
The results of the gas content of rocks by free gases

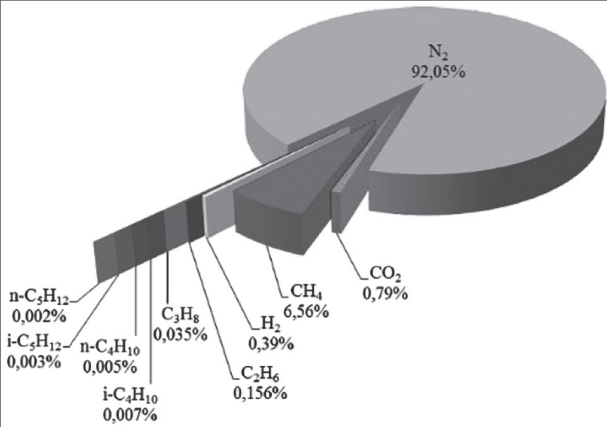
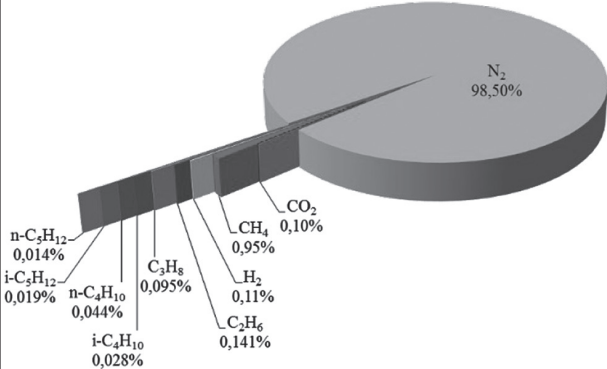
Рудник	Максимальная скорость газовой выделении, л/мин	Максимальная газоносность пород по свободным газам, $\text{м}^3/\text{м}^3$	Компонентный состав свободных газов
Рудник № 1	0,45	0,09	
Рудник № 4	0,38	0,25	

Таблица 10

Результаты газоносности пород по связанным газам
Results of the gas content of rocks by associated gases

Рудник	Горная порода	Максимальная газоносность пород по связанным газам, м ³ /м ³	Компонентный состав связанных газов
Рудник № 1	пирротин-халькопиритовая руда	0,115	<p> N_2 59,68% CH_4 25,63% H_2 11,34% CO_2 0,01% $n-C_5H_{12}$ 0,137% $i-C_4H_{12}$ 0,197% $n-C_4H_{10}$ 0,346% $i-C_4H_{10}$ 0,257% C_2H_6 1,617% </p>
Рудник № 3	долерит	0,067	<p> N_2 80,35% CH_4 7,16% H_2 1,89% CO_2 0,01% $n-C_5H_{12}$ 0,913% $i-C_5H_{12}$ 1,332% $n-C_4H_{10}$ 1,664% $i-C_4H_{10}$ 1,306% C_3H_8 2,757% </p>

По результатам данных эксперимента и лабораторного анализа проб образцов горных пород можно сделать вывод, что газоносность пород по связанным газам в условиях рудников имеет низкие значения и изменяется от 0,008 м³/м³ до 0,115 м³/м³. Связанные газы в породах имеют следующий компонентный состав: метан (CH₄) — изменяется от 0,016% до 46,96%; водород (H₂) изменяется от 0,004% до 34,16%; суммарное содержание тяжелых углеводородных газов (C₂ — C₅) изменяется от 0,01% до 10,59%.

Заключение

Комплекс экспериментальных измерений, выполненных в условиях подзем-

ных выработок, а также лабораторных исследований проб рудничного воздуха и образцов пород позволил определить компонентный состав и содержание газов как в рудничном воздухе, так и в горных породах. На основе результатов исследований выявлены общие закономерности формирования газовых обстановок исследуемых рудников. Кроме этого, для условий рассмотренных рудников изучение техногенных источников газовыделений с точки зрения негативного влияния на параметры рудничной атмосферы имело не меньший интерес, чем изучение природных газовыделений.

В соответствии с полученными результатами комплексных исследований

подземные выработки исследуемых рудников с точки зрения безопасности ведения горных работ были отнесены к негазовым при обеспечении требуемых параметров вентиляции отдельного рудника. Результаты выполненных экспериментальных, лабораторных и теоретических исследований послужили основой для разработки заключения о составе, масштабе, местах и характере выделения газов и паров в рудниках.

В заключение можно отметить, что обобщенные в настоящей работе результаты исследований указывают на необходимость комплексного изучения газовых обстановок действующих рудников.

В результате комплексных исследований появляется возможность установления причинно-следственной связи при формировании газовых обстановок рудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцов А. И. Геологические условия газоносности угольных рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1968. — 330 с.
2. Земков А. Н. Газоносность пород калийных месторождений (аналитический обзор) // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2008. — № 2. — С. 37–44.
3. Zhang Jin Song Determination method of gas content in limestone and its application // International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2022, vol. 7, no. 1, pp. 26–30.
4. Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Моделирование процессов вентиляции шахт для обеспечения метанобезопасности горных работ // Горный журнал. — 2011. — № 7. — С. 101–103.
5. Abouna Saghafi Discussion on determination of gas content of coal and uncertainties of measurement // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, pp. 741–748.
6. Чеботарев А. Г., Гибадулина И. Ю., Горячев Н. С. Загрязнение рудничной атмосферы при использовании самоходного оборудования с дизельным приводом и мероприятия по ее нормализации // Горная промышленность. 2019. — № 2(144). — С. 74–76. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-74-76.
7. Козырев С. А., Власова Е. А. Газовая вредность взрывчатых веществ, применяемых в горнодобывающей промышленности // Горная промышленность. — 2021. — № 5. — С. 106–111. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-106-111.
8. Колесов Е. В., Казаков Б. П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 7. — С. 15–23. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.
9. Накаряков Е. В., Семин М. А., Гришин Е. Л., Колесов Е. В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 5. — С. 41–47. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47.
10. Дистлер В. В., Дюжиков О. А., Лурье А. М., Мкрытычьян А. К., Служеникин С. Ф., Струнин Б. М., Шерман М. Л. Геология и рудоносность Норильского района. — М.: Наука, 1988. — 249 с.
11. Кайтмазов Н. Г. Производство металлов за полярным кругом. Технологическое пособие. — Норильск, 2007. — 597 с.
12. McPherson M. J. Subsurface ventilation and Environmental engineering. London: Chapman & Hall, 2009, 935 p.

13. Семин М. А., Исаевич А. Г., Трушкова Н. А., Бублик С. А., Казаков Б. П. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 2. — С. 82–93. DOI: 10.15372/FTPPI20220208.

14. Исаевич А. Г., Стариков А. Н., Мальцев С. В. Совершенствование метода отбора проб воздуха для определения относительной газообильности горючих газов в рудничной атмосфере // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4. — С. 143–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_26.

15. Накаряков Е. В. Исследование качественного состава рудничной атмосферы тупиковой горной выработки при отгрузке руды техникой с двигателем внутреннего сгорания // Горное эхо. — 2022. — № 2(87). — С. 119–122. DOI: 10.7242/echo.2022.2.19.

16. Медведев И. И., Полянина Г. Д. Газовыделения на калийных рудниках. — М.: Недра, 1974. — 168 с.

17. Андрейко С. С., Калугин П. А., Щерба В. Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управление. — Минск: Вышэйшая школа, 2000. — 335 с.

18. Андрейко С. С., Иванов О. В., Литвиновская Н. А. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. — 159 с.

19. Земсков А. Н., Кондрашев П. И., Травникова Л. Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. — Пермь, 2008. — 414 с.


20. Полянина Г. Д., Земсков А. Н., Падерин Ю. Н. Технология и безопасность разработки Верхнекамского калийного месторождения. — Пермь: Пермское кн. изд-во, 1990. — 262 с.

21. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. Собрание трудов. Т. 1–4. — 1951–1955.

22. Иванов О. В. Оценка газоносности пластов А, Б, В, КРІ, КРІІ, КРІІІ по связанным газам в скважинах на шахтном поле Южного рудника СКРУ-2 ПАО «Уралкалий» // Горное эхо. — 2021. — № 1. — С. 109–115. DOI: 10.7242/echo.2021.1.20.

23. Мальцев С. В., Чайковский И. И. Исследование окислительных процессов сульфидных руд в условиях полиметаллических месторождений // Горное эхо. — 2022. — № 2(87). — С. 114–118. DOI: 10.7242/echo.2022.2.18.

24. Потетня К. М., Садов А. А., Денежко Л. В., Панков Ю. В., Скоморохов В. А. Механизм влияния серы в топливе на выбросы выхлопных газов в двигателях, работающих на дизельном топливе // Научно-технический вестник: технические системы в АПК. — 2018. — № 2(2). — С. 134–143.

25. Зайцев А. В., Казаков Б. П., Кашников А. В., Кормщиков Д. С., Круглов Ю. В., Левин Л. Ю., Мальков П. С., Шалимов А. В. Аналитический комплекс «АэроСеть». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: свид. № 2015610589; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН № 2014613790, заявл. 24.04.2014; опубл. 14.01.2015. 

REFERENCES

1. Kravtsov A. I. *Geologicheskie usloviya gazonosnosti ugol'nykh rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Geological conditions of gas content of coal ore and non-metallic mineral deposits], Moscow, Nedra, 1968, 330 p.

2. Zemkov A. N. Gas content of rocks of potash deposits (analytical review). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2008, no. 2, pp. 37–44. [In Russ].

3. Zhang Jin Song Determination method of gas content in limestone and its application. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2022, vol. 7, no. 1, pp. 26–30.

4. Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Modeling mine ventilation processes to ensure methane safety in mining operations. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 7, pp. 101 – 103. [In Russ].

5. Abouna Saghafi Discussion on determination of gas content of coal and uncertainties of measurement. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, pp. 741 – 748.

6. Chebotarev A. G., Gibadulina I. Yu., Goryachev N. S. Contamination of mine air with exhaust gases of self-propelled machinery and proposed corrective measures. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 2(144), pp. 74 – 76. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-74-76.

7. Kozyrev S. A., Vlasova E. A. Gas hazard of explosives used in the mining industry. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 5, pp. 106 – 111. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-106-111.

8. Kolesov E. V., Kazakov B. P. Efficiency of ventilation of dead-end development headings after blasting operations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 7, pp. 15 – 23. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.

9. Nakaryakov E. V., Semin M. A., Grishin E. L., Kolesov E. V. Analysis of the regularities of accumulation and removal of the exhaust gases from the combustion-engined vehicles in the dead-end chamber-like mine workings. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 5, pp. 41 – 47. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47.

10. Distler V. V., Dyuzhikov O. A., Lur'e A. M., Mkrytych'yan A. K., Sluzhenikin S. F., Strunin B. M., Sherman M. L. *Geologiya i rudonosnost' Noril'skogo rayona* [Geology and ore potential of the Norilsk region], Moscow, Nauka, 1988, 249 p.

11. Kaytmazov N. G. *Proizvodstvo metallov za polyarnym krugom. Tekhnologicheskoe posobie* [Production of metals beyond the Arctic Circle. Technological guide], Noril'sk, 2007, 597 p.

12. McPherson M. J. *Subsurface ventilation and environmental engineering*. London: Chapman & Hall, 2009, 935 p.

13. Semin M. A., Isaevich A. G., Trushkova N. A., Bublik S. A., Kazakov B. P. Calculating dispersion of air pollutants in mines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2022, no. 2, pp. 82 – 93. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPPI20220208.

14. Isaevich A. G., Starikov A. N., Maltsev S. V. Improvement of air sampling method to determine relative concentration of combustion gases in mine air. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 143 – 153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_27.

15. Nakaryakov E. V. Study of the qualitative composition of the mine atmosphere of a dead-end mine working during the shipment of ore by equipment with an internal combustion engine. *Gornoe ekho*. 2022, no. 2(87), pp. 119 – 122. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.2.19.

16. Medvedev I. I., Polyanina G. D. *Gazovydeleniya na kaliynykh rudnikakh* [Gas emissions from potash mines], Moscow, Nedra, 1974.168 s.

17. Andreyko S. S., Kalugin P. A., Shcherba V. Ya. *Gazodinamicheskie yavleniya v kaliynykh rudnikakh: genezis, prognoz i upravlenie* [Gas-dynamic phenomena in potash mines: genesis, forecast and management], Minsk, Vysheyschaya shkola, 2000, 335 p.

18. Andreyko S. S., Ivanov O. V., Litvinovskaya N. A. *Prognozirovaniye i predotvrashcheniye gazodinamicheskikh yavleniy iz pochvy pri prokhodke podgotovitel'nykh vyrabotok v podrabotannom massive solyanykh porod* [Forecasting and prevention of gas-dynamic phenomena from the soil during the excavation of development workings in the undermined massif of salt rocks], Perm, Izd-vo PNIPU, 2015, 159 p.

19. Zemskov A. N., Kondrashev P. I., Travnikova L. G. *Prirodnye gazy kaliynykh mestorozhdeniy i mery bor'by s nimi* [Natural gases of potash deposits and measures to combat them], Perm, 2008, 414 p.

20. Polyanina G. D., Zemskov A. N., Paderin Yu. N. *Tekhnologiya i bezopasnost' razrabotki Verkhnekamskogo kaliynogo mestorozhdeniya* [Technology and safety of development of the Verkhnekamskoye potash deposit], Perm, Permskoe kn. izd-vo, 1990, 262 p.

21. Leybenzon L. S. *Dvizhenie prirodnykh zhidkostey i gazov v poristoy srede. Sobranie trudov* [Movement of natural liquids and gases in a porous medium. Collection of works], vol. 1 – 4. 1951 – 1955.

22. Ivanov O. V. Evaluation of the gas content of formations A, B, C, KRI, KRII, KRIII for associated gases in wells at the mine field of the South Mine SKRU-2 PAO «Uralkalij». *Gornoe ekho*. 2021, no. 1, pp. 109 – 115. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.1.20.

23. Mal'tsev S. V., Chaykovskiy I. I. Research of oxidative processes of sulfide ores in the conditions of polymetallic deposits. *Gornoe ekho*. 2022, no. 2(87), pp. 114 – 118. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.2.18.

24. Potetnyaya K. M., Sadov A. A., Denezhko L. V., Pankov Yu. V., Skomorohov V. A. The mechanism of the effect of sulfur in fuel on emissions of exhaust gases in engines working on diesel fuel. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik: tekhnicheskiiye sistemy v APK*. 2018, no. 2(2), pp. 134 – 143. [In Russ].

25. Zaytsev A. V., Kazakov B. P., Kashnikov A. V., Kormshchikov D. S., Kruglov Yu. V., Levin L. Yu., Mal'kov P. S., Shalimov A. V. *Certificate of state registration of the computer program no. 2015610589*, 14.01.2015. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Паршаков Олег Сергеевич*¹ – канд. техн. наук,
научный сотрудник,

e-mail: olegparshakov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-5545-442X,

*Зайцев Артем Вячеславович*¹ – д-р техн. наук,

зав. сектором, e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,

*Нестеров Егор Анатольевич*¹ – канд. техн. наук,
научный сотрудник,

e-mail: mine_egor@mail.ru,

*Андрейко Сергей Семенович*¹ – д-р техн. наук,

зав. лабораторией, e-mail: ssa@mi-perm.ru,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Паршаков О.С., e-mail: olegparshakov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*O.S. Parshakov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,

e-mail: olegparshakov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-5545-442X,

*A.V. Zaitsev*¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Sector,

e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,

*E.A. Nesterov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,

e-mail: mine_egor@mail.ru,

*S.S. Andreyko*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory, e-mail: ssa@mi-perm.ru,

¹ Mining Institute of Ural Branch,

Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: O.S. Parshakov, e-mail: olegparshakov@gmail.com.

Получена редакцией 03.10.2022; получена после рецензии 12.12.2022; принята к печати 10.01.2023.

Received by the editors 03.10.2022; received after the review 12.12.2022; accepted for printing 10.01.2023.