ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(11-1):137-151
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.814 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_137

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЗРЫВООПАСНОСТИ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

И.В. Абатурова[1,2], Д.И. Симисинов[1], И.А. Савинцев[1,2], Л.А. Стороженко[1,2], В.С. Козлов[1,2]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: 7sinov@mail.ru
[2] ООО «Гингео», Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассмотрены предпосылки и опыт применения экспериментальной оценки взрывоопасности сульфидной пыли в условиях подземных рудников медно-цинковых месторождений. Установка соответствует ГОСТ 12.1.044-89 и обеспечивает определение максимального давления взрыва, нижнего концентрационного предела распространения пламени, минимального взрывоопасного содержания кислорода и минимально флегматизирующей концентрации флегматизатора для различных пылей. По результатам выполненных исследований на трех месторождениях установлено, что породы рудной зоны двух месторождений относятся к категории взрывоопасных с критическими значениями концентрации пыли, при которых происходит воспламенение и дальнейший взрыв образца породы (от 530 до 1800 г/м^3). Дополнительно определялись показатели природной влажности пыли со стенок горных выработок месторождений. Установлено, что показатели природной влажности пыли со стенок горных выработок месторождений 1 и 2 варьируются в диапазоне от 16,7% до 34,8%. В этих условиях взрывоопасность сульфидной пыли сводится к нулю, поскольку при влажности свыше 5% осевшая пыль утрачивает способность переходить во взвешенное состояние, руды месторождения 3 также отнесены к категории невзрывоопасных. Выполненные лабораторные исследования позволили разработать комплекс мероприятий по безопасному производству работ в условиях «пылевого режима».

Ключевые слова: оценка взрывоопасности, взрыв пылевоздушных смесей, сульфидная пыль, установка для определения показателей взрыва, максимальное давление взрыва, влажность пыли, пылевой режим, рудники медно-цинковых месторождений.

Благодарность: Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием, выданным Минобрнауки России, на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075-03-2026-421 от 16.01.2026 «Формирование эффективной и безопасной природно-технической системы месторождений полезных ископаемых на базе информационных технологий моделирования».

Для цитирования: *Абатурова И. В., Симисинов Д. И., Савинцев И. А., Стороженко Л. А., Козлов В. С.* Экспериментальная оценка взрывоопасности сульфидной пыли в условиях подземных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11-1. – С. 137–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_137.

© И.В. Абатурова, Д.И. Симисинов, И.А. Савинцев, Л.А. Стороженко, В.С. Козлов 2026.

Experimental assessment of the explosion hazard of sulfide dust in underground mines

I.V. Abaturova[1,2], D.I. Simisinov[1], I.A. Savintsev[1,2], L.A. Storozhenko[1,2], V.S. Kozlov[1,2]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia, e-mail: 7sinov@mail.ru
[2] LLC «Gingeo», Yekaterinburg, Russia

Abstract: The paper examines the prerequisites and experience of using experimental assessment of the explosive hazard of sulfide dust in underground mines of copper-zinc deposits. The setup complies with GOST 12.1.044-89 and provides the determination of the maximum explosion pressure, the lower concentration limit of flame propagation, the minimum explosive oxygen content, and the minimum flammatizing concentration of the flammatizer for various dusts. Based on the results of studies conducted at three deposits, it was established that the rocks in the ore zone of two deposits belong to the category of explosive substances, with critical dust concentration values at which ignition and subsequent explosion of a rock sample occur ranging from 530 to 1800 g/m^3. In addition, the natural moisture content of the dust from the walls of the mine workings of the deposits was determined. It was established that the natural moisture content of the dust from the walls of the mine workings of deposits 1 and 2 varies in the range from 16.7% to 34.8%. Under these conditions, the explosive hazard of sulfide dust is reduced to zero, since at a humidity level above 5%, the settled dust loses its ability to become suspended; also, the ores from deposit 3 are classified as non-explosive. The laboratory studies carried out made it possible to develop a set of measures for the safe conduct of work under the «dust regime» conditions.

Key words: assessment of explosive hazard, explosion of dust-air mixtures, sulfide dust, equipment for determining explosion parameters, maximum explosion pressure, dust humidity, dust regime, copper-zinc mines.

Acknowledgements: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education in accordance with the state assignment on science for Ural State Mining University № 075-03-2026-421 dated 16.01.2026 «Formation of an efficient and safe natural-technical system of mineral deposits based on information modeling technologies».

For citation: Abaturova I. V., Simisinov D. I., Savintsev I. A., Storozhenko L. A., Kozlov V. S. Experimental assessment of the explosion hazard of sulfide dust in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11-1):137-151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_137.

Введение

В настоящее время на взрывобезопасность проверяют объекты с низкими содержаниями пиритной серы, что связано с тенденцией проявления вспышек и взрывов сульфидной пыли при ведении буровзрывных работ на участках горных выработок, вскрывающих рудные тела с содержанием пиритной серы ниже порогового значения 35% [1]. Соответственно, принятый порог требует корректировки, и действующие нормативы в области промышленной безопасности для опасных объектов горнодобывающей промышленности в большой степени устарели и, к сожалению, не всегда содержат требования и указания, отвечающие современным техническим условиям отработки месторождений колчеданных руд.

Так, по результатам исследований [2] пыль сульфидных минералов с содержанием серы менее 17% воспламеняется с трудом. Однако когда содержание серы превышает 22%, пыль поглощает больше энергии воспламенения, что приводит к повышенному риску взрыва. Кроме того, процесс горения пыли сульфидных минералов более стабилен при содержании влаги от 2% до 4% [2].

В связи с этим проблема обеспечения взрывобезопасности при разработке месторождений колчеданных руд является весьма актуальной и требует своевременного решения и закрепления в нормативной документации [3, 4].

Взрывоопасность сульфидной пыли определяется рядом факторов, таких как общее содержание пиритной серы, размер и количество пылеватых частиц и их влажность. С увеличением содержания пиритной серы в пыли происходит повышение ее взрывчатости. Длительное время повышенное внимание к фактору обеспечения пылевзрывобезопасности было сосредоточено на рудниках, где содержание пиритной серы в рудных телах, согласно «Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритосодерщие колчеданные руды» (введена в действие письмом Министерства цветной металлургии СССР 03.05.1983 г. № НЧ-6697/40), составляло выше 35%.

В работах [5 — 7] отмечается, что в изменяющихся условиях эксплуатации горных предприятий важно учитывать все возможные факторы, которые могут привести к аварии, а также определять, как часто необходимо проводить работы по оценке риска взрывов, по мере расширения горных работ, изменений горно-технологических условий, изменений минералогического состава пород и руд, внедрения в работу нового оборудования и технологий.

С точки зрения механического состава, наибольшую взрывоопасность представляет сульфидная пыль, в составе которой преобладают частицы размером от 10 до 100 мкм. Именно по этой причине для проведения лабораторных испытаний по оценке взрывоопасности сульфидной пыли, согласно п. 4.11.2.2 ГОСТ 12.1.044-89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения», при пробоподготовке требуется обеспечить размер частиц распыляемого реагента (сульфидной пыли) менее 100 мкм.

В то же время сульфидная пыль крупностью частиц более 250 мкм является практически взрывобезопасной [8], так как при данном размере частиц невозможно обеспечить устойчивую пылевоздушную смесь.

Помимо механического состава, значительное влияние на взрывоопасность сульфидной пыли оказывает ее влажность. Принято считать, что при влажности 9 — 9,5% сульфидная пыль не способна взрываться, а при уменьшении влажности от указанного предела до ноля взрывчатость сульфидной пыли возрастает, достигая максимальных значений при абсолютно сухой пыли (при прочих равных условиях) [2].

Концентрационные пределы взрываемости сульфидной пыли имеют значительный разбег, составляя для нижнего предела от 5 до 30 — 40 г/м^3, для верхнего предела от 600 — 1000 до 1500 — 2000 г/м^3, и зависят от сочетания конкретных условий (общее содержание пиритной серы, размер пылеватых частиц, влажность пыли) [9, 10].

Температура воспламенения сульфидной пыли также находится в достаточно широком диапазоне значений и, по экспериментальным данным, составляет от 290 до 460 °С [5, 11].

В настоящий момент единственным действующим на территории Российской Федерации нормативным документом, регламентирующим методику экспериментального определения количественных показателей взрыва пылевоздушных смесей, является ГОСТ 12.1.044-89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». К числу таких показателей относятся: максимальное давление взрыва, нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени, минимальное значение взрывоопасного содержания кислорода и минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора.

Методы

В обзорном исследовании методов оценки взрывоопасности гибридных смесей авторами Wu Dejian, Zhao Peng, Spitzer Stefan и др. [12] указывается на то обстоятельство, что «до сих пор не существует стандартного или специального лабораторного оборудования и процедур, разработанных для исследования взрывчатых веществ гибридных смесей».

В работах А.И. Ермолаева, Н.А. Тетерева, А.М. Кузнецова [13, 14] выполнен ретроспективный обзор изучения взрывоопасности сульфидной пыли и экспериментальных методов ее определения. Отмечается, что эксперименты по изысканию эффективных способов предотвращения взрывов пыли, проводимые различными исследовательскими организациями и рудниками, не позволяют снять остроту вопроса.

При этом в работах Helegda Matous, Pokorny Jiri, Helegda Iris, В.А. Родионова и др. [15—17] приведены данные современных методик и лабораторного оборудования, нашедших применение для исследования параметров взрыва гибридных смесей.

Институтом химической кинетики и горения СО РАН (ИХКГ СО РАН), согласно принципиальной схеме установки и методики для экспериментального определения количественных показателей взрыва пылевоздушных смесей, указанной в п. 4.10 ГОСТ 12.1.044-89, была спроектирована и изготовлена опытная установка для определения показателей взрыва пылевоздушных смесей (УОПВПС-1) [18]. При проектировании и изготовлении лабораторной установки были уточнены некоторые важные характеристики конструкции инициатора взрыва [19]. Лабораторные установки, изготовленные ИХКГ СО РАН, находятся в городах Екатеринбурге и Кемерово [20].

На базе установки, принадлежащей лаборатории ООО «ГИНГЕО», совместно с Уральским государственным горным университетом были проведены исследования взрывоопасности сульфидной пыли в условиях подземных рудников медно-цинковых месторождений.

Описание оборудования и условия проведения испытаний

Установка (УОПВПС-1), на которой были проведены исследования, применяется для определения показателей максимального давления взрыва, нижнего концентрационного предела распространения пламени, минимального взрывоопасного содержания кислорода и минимально флегматизирующей концентрации флегматизатора для различных пылей (органических твердых веществ, углей) согласно ГОСТ 12.1.044-89.

Установка состоит из реакционного сосуда, спирального подогревателя, ресивера, линии распыления, форкамеры, линий подачи газа, управляющей электроники, газоанализатора (рис. 1).

В форкамеру помещают навеску распыляемого реагента (образца). Перед испытанием исследуемые вещества про-

сеивают и в дальнейшем используют образцы с размерами частиц менее 50 мкм для металлов и менее 100 мкм — для горных пород (п. 4.11.2.2 ГОСТ 12.1.044-89).

По сигналу управления открывается пневмораспределитель, и струя сжатого газа из ресивера подхватывает образец в виде пыли (известной массы) и устремляется в сосуд. Частицы пыли попадают на заранее разогретую спираль нагрева и воспламеняются.

Если концентрация пыли в сосуде выше нижнего концентрационного предела, то по всей пылегазовой смеси распространяется волна горения и в сосуде повышается давление (рис. 2). Если концентрация реагента недостаточна для горения, в сосуде будет наблюдаться прирост давления только за счет перепуска газа из ресивера в реакционный сосуд и нагрева газа за счет спирали.

В случае воспламенения и дальнейшего взрыва давление возрастет и будет выше равновесного давления после перепуска газа из ресивера в реакционный сосуд.

Сигнал датчика давления регистрируется и анализируется компьютерной программой. Фиксируется зависимость текущего давления от времени, вычисляются нормированное (приведенное к атмосферному) максимальное давление и концентрация пыли. Если максимальное



Рис. 1. Общий вид установки для определения показателей взрыва пылевоздушных смесей

Fig. 1. General view of the setup for determining the explosion characteristics of dust-air mixtures

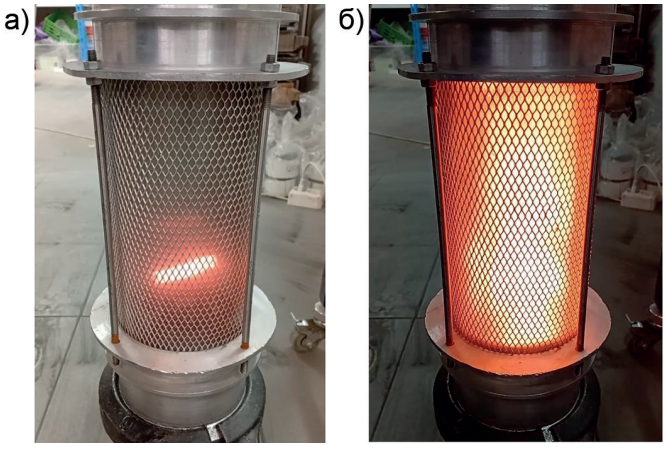


Рис. 2. Проведение испытаний по определению взрывоопасности горных пород: спираль нагрева в начале испытания (а); взрыв образца (концентрация пылевоздушной смеси 1646 г/м³) (б)

Fig. 2. Conducting tests to determine the explosive hazard of rock formations: heating coil at the beginning of the test (a); explosion of the sample (concentration of the dust-air mixture: 1646 g/m³) (b)

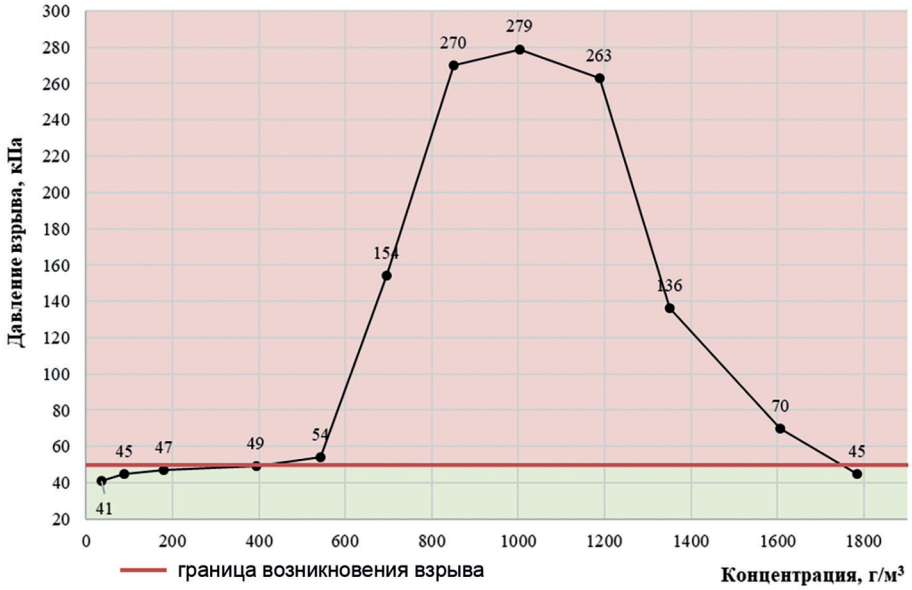


Рис. 3. График зависимости концентрации вещества от давления взрыва
Fig. 3. Graph showing the dependence of concentration on explosion pressure

давление ниже 50 кПа (п. 4.11.4.3 ГОСТ 12.1.04489), то считается, что смесь в этих условиях не горит и невзрывоопасна.

Для определения оптимальной концентрации исследуемого вещества строят кривую зависимости давления взрыва ($p_{взр}$) от концентрации вещества (ρ_s) (рис. 3). Массу образца, соответствующую наибольшему из полученных значений $p_{взр}$, принимают за оптимальную. Наибольшее из полученных значений давления взрыва принимают за максимальное давление взрыва исследуемого вещества.

Результаты исследований взрывоопасности пыли

Исследования по определению взрывоопасности пород были проведены на трех месторождениях.

Месторождение-1. Вмещающие породы представлены:

• габбро порфировидной структуры, массивной текстуры, состоящие из крупных вкрапленников плагиоклаза и пироксена (10%), основная масса полнокристаллической структуры сложена теми же минералами;

• долеритом тонко-мелкозернистой структуры, массивной текстуры с минеральным составом: плагиоклаз (30%), пироксен (70%);

• плагиоклазовыми базальтами, состоящими из вкрапленников плагиоклаза (10—15%), пироксена (до 5%) и тонкозернистой основной массы;

• метасоматически измененными риодацитами, где обломочный материал представлен окварцованными риолитами уплощенно-вытянутой формы и единичными базальтами (размер обломков от 5 до 15 мм).

Цементирующая масса представлена лавовым материалом, затронутым окварцеванием, серицитизацией.

На Месторождении-2 вмещающие породы сложены:

• габбро мелкозернистой структуры, массивной текстуры с минеральным составом: плагиоклаз (40%), пироксен (60%);

• эруптивными брекчиями кислого состава зеленовато-серого цвета, состоя-

щими из обломков остроугольной формы, представленными риолитами скрытозернистой структуры, с мелкими кристаллами пирита, которые составляют (до 75%) от общей массы.

Цементирующая масса окварцована, частично хлоритизирована и содержит сульфидную минерализацию, представленную пиритом в виде гнездообразных скоплений.

Месторождение-3. Вмещающие породы включают в себя:

• эруптивные брекчии смешанного состава, обломки представлены дацитом, липаритом, пиритом, в цементе туф кислого состава;

• диабазовые и кварцевые порфириты, порфировой структуры, массивной текстуры;

• кварц-серицит-пиритовые метасоматиты, с минеральным составом: кварц (до 20%), серицит (50%), пирит (30%).

Рудные тела на всех месторождениях охарактеризованы как медные, медно-цинковые, серные колчеданы.

Медная колчеданная руда — от неравномернозернистой до мелкозернистой структуры, массивной текстуры. Минеральный состав: халькопирит в виде тонкозернистых масс (3—10%), сфалерит в виде рассеянных масс (2—5%). Основная рудная масса выполнена мелкозернистым пиритом, который занимает (83—95%), в руде также присутствуют продукты окисления пирротина буровато-черного цвета (до 7%). Нерудные минералы представлены кальцитом (до 1%). Медноцинковая колчеданная руда характеризуется массивной структурой, брекчиевидно-полосчатой текстурой. Состоит из обломков, сложенных мелкозернистым пиритовым агрегатом (до 1 см), которые занимают 60—85%, и халькопирит-пирит-сфалеритовым материалом (до 10%). Нерудные минералы представлены кальцитом в виде единичных гнезд (до 2%).

Серный колчедан массивной текстуры, в составе отмечается пирит (97%) и серицит (3%).

На Месторождении-1 исследования проведены по 5 пробам рудной зоны (медный, медно-цинковый, серный колчеданы) и по 4 пробам вмещающих пород, представленных габбро, долеритами, базальтами и метасоматитами.

Согласно полученным результатам исследований, установлено, что породы рудной зоны относятся к категории взрывоопасных с критическими значениями концентрации пыли, при которых происходит воспламенение и дальнейший взрыв образца породы (составляют от 530 до 1800 г/м^3)(табл. 1).

Вмещающие породы характеризуются максимальным давлением взрыва ниже 50 кПа, в таких условиях смесь не горит, и данные породы можно отнести к невзрывоопасным (см. табл. 1).

Исследования по определению взрывоопасности пород Месторождения-2 проводились по 5 пробам рудной зоны (медный, медно-цинковый, серный колчеданы, медно-вкрапленная руда) и по двум пробам вмещающих пород, представленных габбро и эруптивными брекчиями.

Согласно полученным результатам исследований, установлено, что колчеданы различного состава относятся к категории взрывоопасных и имеют критические значения концентрации пыли от 180 до 1800 г/м^3, при которых происходит воспламенение и дальнейший взрыв образца породы.

Медно-вкрапленная руда и вмещающие породы характеризуются максимальным давлением взрыва ниже 50 кПа, в таких условиях смесь не горит, и данные породы можно отнести к невзрывоопасным (табл. 2).

Исследования по определению взрывоопасности пород Месторождения-3 были проведены по 19 пробам рудной

Таблица 1

Результаты определения показателей взрыва пылевоздушных смесей пород месторождения-1
The results of determining the explosion parameters of dust-air mixtures of rocks from deposit-1

Наименование породы	Давление взрыва, кПа *Концентрация пылевоздушной смеси* *при соответствующей навеске пыли, гр*												Категория пород по взрывоопасности *Взрывоопасная концентрация, г/м³*
	0,2	*0,5*	*1,0*	*2,0*	*3,0*	*4,0*	*5,0*	*6,0*	*7,0*	*8,0*	*9,0*	*10,0*	
Медный колчедан	47 *35*	43 *86*	41 *171*	45 *360*	52 *536*	119 *715*	116 *875*	211 *1029*	269 *1225*	185 *1410*	217 *1606*	94 *1830*	Взрывоопасные *530-1800*
Медный колчедан	43 *35*	45 *89*	46 *180*	41 *331*	51 *548*	83 *692*	129 *875*	202 *1055*	238 *1270*	112 *1439*	54 *1579*	44 *1683*	Взрывоопасные *550-1600*
Медный колчедан	49 *35*	51 *89*	50 *180*	50 *363*	57 *542*	64 *735*	77 *905*	101 *1094*	240 *1272*	296 *1452*	372 *1646*	177 *1852*	Взрывоопасные *730-1800*
Медный колчедан	45 *35*	44 *89*	46 *182*	39 *314*	53 *542*	48 *723*	67 *914*	96 *1096*	315 *1280*	200 *1455*	61 *1623*	49 *1771*	Взрывоопасные *900-1650*
Медно-цинковый колчедан	42 *34*	45 *87*	50 *178*	47 *352*	53 *538*	96 *712*	176 *907*	225 *1105*	291 *1280*	113 *1415*	50 *1526*	46 *1695*	Взрывоопасные *530-1420*
Медно-цинковый колчедан	48 *36*	50 *91*	47 *180*	48 *341*	50 *537*	49 *679*	202 *895*	138 *1083*	290 *1192*	347 *1385*	288 *1649*	168 *1804*	Взрывоопасные *900-1800*
Медно-цинковый колчедан	41 *35*	45 *89*	47 *179*	49 *393*	54 *542*	154 *696*	270 *851*	279 *1003*	263 *1189*	136 *1350*	70 *1607*	45 *1785*	Взрывоопасные *540-1610*
Медно-цинковый колчедан	43 *35*	45 *89*	50 *180*	48 *333*	51 *540*	47 *690*	292 *906*	290 *1111*	315 *1279*	93 *1417*	188 *1608*	74 *1742*	Взрывоопасные *900-1800*
Серный колчедан	42 *34*	48 *89*	50 *179*	45 *333*	56 *539*	53 *707*	59 *904*	66 *1083*	273 *1090*	322 *1413*	370 *1643*	212 *1812*	Взрывоопасные *540-1800*
Серный колчедан	45 *35*	46 *89*	47 *177*	44 *344*	71 *544*	191 *747*	281 *912*	363 *1089*	314 *1290*	277 *1456*	254 *1657*	280 *1850*	Взрывоопасные *500-1800*
Габбро	-	-	32 *167*	30 *315*	33 *489*	35 *670*	38 *816*	42 *998*	-	-	-	-	Невзрывоопасные *отсутствует*
Долерит	-	-	45 *174*	45 *358*	42 *529*	47 *710*	43 *890*	37 *1044*	-	-	-	-	Невзрывоопасные *отсутствует*
Базальт	35 *32*	40 *86*	42 *172*	40 *329*	47 *510*	49 *675*	46 *844*	43 *972*	-	-	-	-	Невзрывоопасные *отсутствует*
Метасоматит	-	43 *89*	45 *180*	39 *335*	28 *537*	34 *718*	44 *899*	38 *1057*	42 *1229*	-	-	-	Невзрывоопасные *отсутствует*

Таблица 2

Результаты определения показателей взрыва пылевоздушных смесей пород месторождения-2
The results of determining the explosion parameters of dust-air mixtures of rocks from deposit-2

Наименование породы	Давление взрыва, кПа *Концентрация пылевоздушной смеси* *при соответствующей навеске пыли, гр.*												Категория пород по взрывоопасности *Взрывоопасная концентрация, г/м³*
	0,2	*0,5*	*1,0*	*2,0*	*3,0*	*4,0*	*5,0*	*6,0*	*7,0*	*8,0*	*9,0*	*10,0*	
Медный колчедан	42 *35*	47 *89*	49 *180*	44 *369*	54 *542*	112 *723*	196 *912*	155 *1110*	174 *1286*	225 *1409*	274 *1645*	202 *1863*	Взрывоопасные *540-1800*
Медный колчедан	45 *35*	50 *90*	50 *181*	50 *351*	57 *541*	154 *706*	300 *914*	88 *1038*	64 *1280*	112 *1439*	267 *1643*	54 *1774*	Взрывоопасные *500-1800*
Медно-вкрапленная руда	39 *35*	48 *91*	40 *179*	40 *351*	40 *519*	39 *704*	40 *875*	40 *1070*	43 *1238*	49 *1405*	44 *1586*	-	Невзрывоопасные *отсутствует*
Медно-вкрапленная руда	49 *36*	40 *87*	44 *179*	49 *349*	49 *539*	47 *702*	47 *898*	45 *992*	47 *1194*	45 *1354*	48 *1574*	46 *1663*	Невзрывоопасные *отсутствует*
Медно-цинковый колчедан	47 *35*	48 *89*	55 *180*	52 *361*	59 *544*	155 *725*	273 *908*	290 *1098*	333 *1282*	300 *1442*	255 *1579*	167 *1750*	Взрывоопасные *180-1800*
Медно-цинковый колчедан	45 *35*	44 *89*	46 *180*	45 *370*	50 *544*	46 *694*	54 *894*	129 *1069*	302 *1255*	193 *1389*	154 *1582*	105 *1777*	Взрывоопасные *900-1800*
Медно-цинковый колчедан	46 *35*	43 *89*	45 *179*	44 *340*	50 *545*	48 *726*	58 *909*	116 *1065*	237 *1277*	204 *1419*	172 *1589*	94 *1747*	Взрывоопасные *900-1800*
Медно-цинковый колчедан	45 *35*	46 *89*	48 *180*	49 *366*	52 *548*	115 *694*	283 *914*	155 *1078*	270 *1371*	264 *1297*	191 *1623*	65 *1835*	Взрывоопасные *500-1800*
Серный колчедан	-	37 *85*	37 *182*	46 *357*	50 *538*	94 *700*	250 *899*	205 *1076*	220 *1268*	186 *1389*	269 *1588*	168 *1766*	Взрывоопасные *700-1800*
Серный колчедан	39 *35*	42 *89*	49 *182*	50 *374*	53 *438*	47 *576*	59 *900*	271 *1100*	313 *1264*	196 *1445*	255 *1619*	149 *1784*	Взрывоопасные *900-1800*
Габбро	-	39 *86*	38 *172*	37 *334*	39 *526*	41 *700*	38 *865*	45 *1050*	49 *1250*	-	-	-	Невзрывоопасные *отсутствует*
Эруптивная брекчия	-	-	33 *158*	47 *303*	41 *485*	49 *666*	47 *848*	42 *1003*	-	-	-	-	Невзрывоопасные *отсутствует*

Таблица 3

Результаты определения показателей взрыва пылевоздушных смесей пород месторождения-3
The results of determining the explosion parameters of dust-air mixtures of rocks from deposit-3

Наименование породы	Давление взрыва, кПа Концентрация пылевоздушной смеси при соответствующей навеске пыли, гр												Категория пород по взрывоопасности Взрывоопасная концентрация, г/м³
	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	
Медная вкрапленная руда	-	47 87	50 177	49 358	48 529	50 714	48 883	-	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медный колчедан	-	-	46 168	45 352	42 513	47 704	49 924	48 1072	47 1222	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковый колчедан	-	41 75	47 176	43 537	43 537	45 720	49 877	48 1058	48 1166	46 1370	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковая вкрапленная руда	-	-	45 178	42 346	48 548	48 732	47 897	-	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковый колчедан	-	40 72	42 166	43 343	47 552	45 741	40 852	43 1058	44 1215	47 1365	42 1505	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковая вкрапленная руда	-	-	48 179	48 356	45 549	44 679	29 761	-	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Серный колчедан	-	-	50 179	50 358	44 521	49 710	45 864	42 1037	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медная вкрапленная руда	44 42	50 86	46 180	43 358	42 537	48 713	46 897	46 1065	49 1193	46 1349	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медный колчедан	42 34	49 79	50 178	50 350	48 547	43 718	47 900	48 1016	44 1145	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковый колчедан	-	-	49 184	50 368	50 534	50 698	48 891	-	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковая вкрапленная руда	-	-	38 169	49 368	45 535	40 687	45 897	-	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Серный колчедан	-	49 85	45 182	48 363	45 536	45 684	46 888	-	-	-	-	-	Невзрывоопасные отсутствует
Медно-цинковый колчедан	-	-	47 176	49 362	47 530	44 677	45 898	45 1047	46 1169	44 1344	-	-	Невзрывоопасные отсутствует

зоны (медный, медно-цинковый, серный колчеданы, медно-вкрапленная, медно-цинковая вкрапленная руды) и по 6 пробам вмещающих пород, представленных эруптивной и эксплозивной брекчиями, диабазовыми, кварцевыми липаритовыми и кварцевыми дацитовыми порфиритами, метасоматитами кварц-серицит-хлоритовыми.

Согласно полученным результатам исследований, установлено, что отличительной чертой Месторождения-3 является отсутствие взрыва при лабораторных исследованиях проб рудной зоны. Таким образом, вмещающие породы и породы рудной зоны относятся к категории невзрывоопасных. Максимальное давление взрыва во всех испытаниях не превышало 50 кПа, в таких условиях смесь не горит (табл. 3).

Таким образом, вмещающие породы Месторождений 1, 2 и 3 отнесены к категории невзрывоопасных. Максимальное давление взрыва во всех испытаниях не превышало 50 кПа, в таких условиях смесь не горит. При проведении лабораторных исследований было установлено, что породы рудной зоны Месторождения-3 (пробы 1 — 13) и медно-вкрапленная руда Месторождения-2 (пробы 3, 4) также относятся к категории невзрывоопасных.

Породы рудных зон (медный, медно-цинковый, серный колчеданы) Месторождений 1 и 2 относятся к категории взрывоопасных.

Результаты исследований влажности пыли

В рамках комплексного изучения оценки взрывопожароопасности серной или сульфидной пыли месторождений, где по результатам исследований выявлены взрывоопасные руды, был осуществлен отбор проб пыли со стенок горных выработок. Основной целью данного этапа работ является оценка влажности отобранных образцов, поскольку при влажности 9 — 9,5% сульфидная пыль, как уже подчеркивалось, не способна взрываться, а при уменьшении влажности от указанного предела до ноля взрывчатость сульфидной пыли возрастает, достигая максимальных значений при абсолютно сухой пыли (при прочих равных условиях).

Таким образом, испытания проводились только для Месторождений 1 и 2, где было отобрано по 10 проб, пробы снимались со стенок буровых орт, рассечек, погрузочных заездов и вентиляционных сбоек.

По результатам выполненных исследований установлено, что показатели природной влажности пыли со стенок горных выработок Месторождений 1 и 2 варьируются в диапазоне от 16,7% до 34,8%.

Источником повышенной влажности являются прерывистый капеж и высачивание воды на стенках выработок, а также водопритоки в горные выработки. За период с января по сентябрь 2025 г. зафиксированы следующие средние объемы поступающей воды: для Месторождения-1 — ≈ 117 300 м^3/мес.; для Месторождения-2 — ≈ 84 400 м^3/мес.

Заключение

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать вывод о том, что в пределах рудных залежей Месторождений 1 и 2 взрывоопасность серной или сульфидной пыли сводится к нулю, поскольку при влажности свыше 5% осевшая пыль утрачивает способность переходить во взвешенное состояние, угроза взрыва отсутствует (Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритосодержащие колчеданные руды, 1991 г.), также руды Месторождения-3 отнесены к категории невзрывоопасных.

Выполненные лабораторные исследования позволили разработать комплекс мероприятий по безопасному производству работ в условиях «пылевого режима». В специальных мероприятиях было предусмотрено, что «Пылевой режим» устанавливается при обнаружении и установлении опасности взрыва пыли в процессе ведения горных работ или эксплуатации объекта, когда техническим руководителем организации обнаружена недостаточная обводненность системы горных выработок, входящих в конкретную рабочую зону.

Комплекс мероприятий, разработанный по результатам выполненных исследований, объединяет организационные и технические меры. К организационным отнесены: составление и утверждение техническим руководителем рудника перечня горных выработок, опасных по скоплению пыли, с пересмотром его при изменении горно-геологических и горнотехнических условий; отбор проб пыли со стенок выработок с определением ее влажности и содержания пиритной серы при смещении границ рабочих зон; введение «пылевого режима» распорядительным документом предприятия в тех выработках, где влажность отложившейся пыли опускается ниже 5%; периодический инструктаж персонала по мерам профилактики взрывов сульфидной пыли; включение в план мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий позиции «взрыв сульфидной пыли в подземных горных выработках».

Технические меры направлены на исключение перехода отложившейся пыли во взвешенное состояние и на предотвращение ее воспламенения: орошение почвы, бортов и кровли выработок, обмывка выработок водой, водораспылительные завесы и водяные заслоны; смачивание поверхности призабойной зоны на протяжении не менее 10 м от забоя перед взрывными работами в проходческих выработках и не менее 30 м от крайних заряжаемых скважин при очистной выемке; бурение шпуров и скважин с промывкой водой; обязательное применение забойки, в том числе гидроампульной; применение аммиачно-селитренных, в том числе эмульсионных, взрывчатых веществ с ингибиторами; производство взрывных работ в междусменные перерывы при отсутствии людей на исходящей струе; оснащение машин с двигателями внутреннего сгорания пламегасительными устройствами и экспресс-контроль содержания оксидов углерода, азота и серы в рудничной атмосфере.

Значительная часть арсенала пылевзрывозащиты, разработанного для угольных шахт, переносима и на рудники: ведение перечня выработок, опасных по пылевым отложениям, нормирование периодичности контроля пылеотложения, связывание и смыв осевшей пыли, установка заслонов для локализации вспышки, отражение взрыва пыли в плане ликвидации аварий. Вместе с тем прямой перенос ограничен природой процесса. Для угольной пыли определяющим является выход летучих с последующим горением в газовой фазе, что и обусловливает эффективность осланцевания инертной пылью; для сульфидной пыли ведущую роль играет окисление пирита с выделением диоксида серы и значительным тепловым эффектом, а наиболее действенным фактором, как показали выполненные исследования, оказывается влажность: при значениях свыше 5% осевшая пыль не переходит во взвешенное состояние. Поэтому в условиях обводненных колчеданных рудников центром комплекса мероприятий становится не осланцевание, а гидрообеспыливание, водяные заслоны и систематический контроль влажности пылевых отложений. Для обеспечения взрывобе-

зопасности и предотвращения потенциальных рисков в проходческих и очистных забоях, связанных с пылеобразованием, необходимо обеспечить ежемесячный контроль за влажностью пыли со стенок горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Уфатова З. Г.* Современное состояние проблемы прогнозирования самовозгорания и взрывчатости сульфидных руд и вмещающих пород на глубине более 1500 м // Горная промышленность. — 2021. — № 2. — С. 77—80. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-77-80.

2. *Li Z., Zhou K., Zhu Z., Xu Y., Zhao J., Chen Y., Xu Y.* The influence of sulfur content and moisture content on the ignition energy of sulfide mineral dust // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2025, vol. 47, no. 2. DOI: 10.1080/15567036.2025.2594677.

3. *Рыльникова М. В.*, *Митишова Н. А.*, *Пономарев А. П.* К обоснованию нормативно-правовой базы безопасного недропользования при освоении месторождений колчеданных руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2019. — № 3. — С. 97—107.

4. *Рыльникова М. В.*, *Айнбиндер Г. И.*, *Митишова Н. А.*, *Гаджиева Л. А.* Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 2. — С. 341—356.

5. *Рыльникова М. В.*, *Митишова Н. А.* Методика исследований взрывоопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 41—51. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-41-51.

6. *Скопинцева О. В.*, *Рыбичев А. А.*, *Баловцев С. В.* Нейтрализация взрывчатых свойств остаточных углеводородов угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 11. — С. 140—152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140.

7. *Скопинцева О. В.*, *Баловцев С. В.*, *Рыбичев А. А.* Исследование взрывопожароопасности угольной пыли пластов средней стадии метаморфизма // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 5. — С. 80—94. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_80.

8. *Парамонов Г. П.* Предупреждение взрывов сульфидной пыли на колчеданных рудниках. — СПб.: СПГГИ, 1999. — 130 с.

9. *Huang Q., Xu B., Feng J., Lu Y., Wang X., Liu Q.* Experimental investigation on spontaneous combustion characteristics of sulfide ores with different sulfur content // Minerals. 2025, vol. 15, article 880. DOI: 10.3390/min15080880.

10. *Yu Yanqiu, Fan Jianchun* Research on explosion characteristics of sulfur dust and risk control of the explosion // Procedia Engineering. 2014, vol. 84, pp. 449—459. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.455.

11. *Liu Q.*, *Katsabanis P. D.* Hazard evaluation of sulphide dust explosions // Journal of Hazardous Materials. 1993, vol. 33, no. 1, pp. 35—49. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85062-J.

12. *Wu Dejian, Zhao Peng, Spitzer Stefan, Krietsch Arne, Amyotte Paul, Krause Ulrich* A review on hybrid mixture explosions: Safety parameters, explosion regimes and criteria, flame characteristics // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2023, vol. 82. DOI: 10.1016/ j.jlp.2022.104969.

13. *Ермолаев А. И.*, *Тетерев Н. А.* Анализ исследований в области пылевых взрывов и их предупреждения на подземных рудниках // Известия вузов. Горный журнал. — 2015. — № 8. — С. 75—80.

14. *Тетерев Н. А.*, *Ермолаев А. И.*, *Кузнецов А. М.* Исследование влияния физико-химических свойств сульфидной пыли на ее взрывчатость // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № S63. — С. 3—11.

15. *Helegda Matous, Pokorny Jiri, Helegda Iris, Skrinsky Jan, Sinay Juraj* Parameters affecting the explosion characteristics of hybrid mixtures arising from the use of alternative energy sources // Fire. 2024, vol. 7, article 139. DOI: 10.3390/fire7040139.

16. *Laevsky Yu., Nosova T.* Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2099, no. 1, article 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.

17. *Родионов В. А.*, *Карпов Г. Н.*, *Лейсле А. В.* Методологический подход к оценке взрывопожароопасных свойств сульфидсодержащих полиметаллических руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 198—213. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_198.

18. *Манжос Е. В.*, *Коржавин А. А.* Исследование инициирования волны фильтрационного горения газа открытым пламенем // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2024. — № 2(63). — С. 54—66. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66.

19. *Манжос Е. В.*, *Коржавин А. А.*, *Козлов Я. В.*, *Намятов И. Г.* Уточнение параметров установки для определения показателей взрыва пылевоздушных смесей // Горение и взрыв. — 2021. — Т. 14. — С. 11—21. DOI: 10.30826/CE21140309.

20. *Храмцов В. И.*, *Манжос Е. В.*, *Коржавин А. А.*, *Козлов Я. В.*, *Айкин А. В.* Определение показателей взрыва гибридных смесей // Уголь. — 2025. — № 2(1190). — С. 64—68. DOI: 10.18796/0041- 5790-2025-2-64-68. ГИАБ

REFERENCES

1. Ufatova Z. G. The current state of the problem of predicting spontaneous combustion and explosiveness of sulfide ores and host rocks at depths exceeding 1500 m. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 2, pp. 77—80. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-77-80.

2. Li Z., Zhou K., Zhu Z., Xu Y., Zhao J., Chen Y., Xu Y. The influence of sulfur content and moisture content on the ignition energy of sulfide mineral dust. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2025, vol. 47, no. 2. DOI: 10.1080/15567036.2025.2594677.

3. Rylnikova M. V., Mitishova N. A., Ponomarev A. P. On the justification of the regulatory and legal framework for the safe use of subsoil resources in the development of pyrite ore deposits. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2019, no. 3, pp. 97—107. [In Russ].

4. Rylnikova M. V., Aynbinder G. I., Mitishova N. A., Gadzhieva L. A. Study of the patterns of ignition of sulfide ores and rocks during combined development of deposits. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 2, pp. 341—356. [In Russ].

5. Rylnikova M. V., Mitishova N. A. Research technique for explosion hazard of low-grade sulphide ore in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 9, pp. 41—51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-41-51.

6. Skopintseva O. V., Rybichev A. A., Balovtsev S. V. Neutralization of the explosive properties of residual hydrocarbons in coal seams by gas-filled solutions of surfactant agents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 11, pp. 140—152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140.

7. Skopintseva O. V., Balovtsev S. V., Rybichev A. A. Investigation of the explosion and fire hazard of coal dust in formations of the middle stage of metamorphism. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 5, pp. 80—94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_80.

8. Paramonov G. P. *Preduprezhdenie vzryvov sul'fidnoy pyli na kolchedannykh rudnikakh* [Prevention of sulfide dust explosions in pyrite mines], Saint-Petersburg, 1999, 130 p.

9. Huang Q., Xu B., Feng J., Lu Y., Wang X., Liu Q. Experimental investigation on spontaneous combustion characteristics of sulfide ores with different sulfur content. *Minerals*. 2025, vol. 15, article 880. DOI: 10.3390/min15080880.

10. Yu Yanqiu, Fan Jianchun Research on explosion characteristics of sulfur dust and risk control of the explosion. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 84, pp. 449—459. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.455.

11. Liu Q., Katsabanis P. D. Hazard evaluation of sulphide dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1993, vol. 33, no. 1, pp. 35—49. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85062-J.

12. Wu Dejian, Zhao Peng, Spitzer Stefan, Krietsch Arne, Amyotte Paul, Krause Ulrich A review on hybrid mixture explosions: Safety parameters, explosion regimes and criteria, flame characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023, vol. 82. DOI: 10.1016/ j.jlp.2022.104969.

13. Ermolaev A. I., Teterev N. A. Analysis of research in the field of dust explosions and their prevention in underground mines. *Minerals and Mining Engineering*. 2015, no. 8, pp. 75—80. [In Russ].

14. Teterev N. A., Ermolaev A. I., Kuznetsov A. M. Study of the influence of the physicochemical properties of sulfide dust on its explosiveness. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. S63, pp. 3—11. [In Russ].

15. Helegda Matous, Pokorny Jiri, Helegda Iris, Skrinsky Jan, Sinay Juraj Parameters affecting the explosion characteristics of hybrid mixtures arising from the use of alternative energy sources. *Fire*. 2024, vol. 7, article 139. DOI: 10.3390/fire7040139.

16. Laevsky Yu., Nosova T. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2099, no. 1, article 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.

17. Rodionov V. A., Karpov G. N., Leisle A. V. Methodological approach to the need to assess the explosion and fire hazard properties of sulfide-containing polymetallic ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 198—213. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_198.

18. Manzhos E. V., Korzhavin A. A. Investigation of initiation of a filtration gorenje gas wave by an open flame. *Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*. 2024, no. 2(63), pp. 54—66. [In Russ]. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66.

19. Manzhos E. V., Korzhavin A. A., Kozlov Ya. V., Namyatov I. G. Refinement of the parameters of the installation for determining the explosion indicators of dust-air mixtures. *Combustion and explosion*. 2021, vol. 14, pp. 11—21. [In Russ]. DOI: 10.30826/CE21140309.

20. Khramtsov V. I., Manzhos E. V., Korzhavin A. A., Kozlov Ya. V., Aykin A. V. Determination of the blast parameters of hybrid mixtures. *Ugol'*. 2025, no. 2(1190), pp. 64—68. [In Russ]. DOI: 10. 18796/0041- 5790-2025-2-64-68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абатурова Ирина Валерьевна[1,2] — д-р геол.-минерал. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: gingeo@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4829-3204,
Симисинов Денис Иванович[1] — д-р. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой, e-mail: 7sinov@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6095-0073,
Савинцев Иван Андреевич[1,2] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: Ivan.Savincev@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4760-9900,
Стороженко Любовь Александровна[1,2] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, зав. кафедрой, e-mail: stor_luba@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4185-956X,
Козлов Владислав Сергеевич[1,2] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: mr.vkla@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9435-957X,
[1] Уральский государственный горный университет,
[2] ООО «Гингео».
Для контактов: Симисинов Д.И., e-mail: 7sinov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.V. Abaturova[1,2], Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor, Head of Chair,
e-mail: gingeo@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4829-3204,
D.I. Simisinov[1], Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,
e-mail: 7sinov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-6095-0073,
I.A. Savintsev[1,2], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,
e-mail: Ivan.Savincev@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-4760-9900,
L.A. Storozhenko[1,2], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,
Head of Chair, e-mail: stor_luba@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4185-956X,
V.S. Kozlov[1,2], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,
e-mail: mr.vkla@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9435-957X,
[1] Ural State Mining University, 620144, Yekaterinburg, Russia,
[2] LLC «Gingeo», 620014, Yekaterinburg, Russia.
Corresponding author: D.I. Simisinov, e-mail: 7sinov@mail.ru.

Получена редакцией 02.08.2026; получена после рецензии 14.09.2026; принята к печати 20.10.2026.
Received by the editors 02.08.2026; received after the review 14.09.2026; accepted for printing 20.10.2026.