

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

В. А. Родионов<sup>1</sup>, Г. Н. Карпов<sup>1</sup>, А. В. Лейсле<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

**Аннотация:** Рассматривается методологический подход к экспресс-оценке токсикологических и взрывопожарных (эндогенных) опасностей в процессе ведения горнопроходческих работ, связанных с добычей сульфидной полиметаллической руды, содержащей, прежде всего, химически связанные мышьяк и серу, без применения наукоемкого материально-технического обеспечения и высококвалифицированного научно-технического персонала. Дается краткий обзор проблематики возникновения токсикологических и взрывопожарных опасностей, возникающих в процессе ведения горнопроходческих работ, связанных с добычей таких руд. Показано, что, несмотря на все принимаемые меры и действия по профилактике возникновения токсикологической, эндогенной и взрывной опасностей (взрыв сульфидной пыли), возникающих в процессе добычи данных руд, проблема экспресс-оценки опасных свойств породной массы является актуальной. Цель статьи: проанализировать методы, которые могут быть применены в качестве экспресс-методов оценки опасных свойств рудных материалов при их непосредственной добыче в руднике и предложить варианты, как тот или иной экспресс-метод может быть реализован компанией, осуществляющей добычу полиметаллических руд, непосредственно в забое или в кратчайшие сроки без использования высокотехнологичного оборудования. Из рассматриваемых в статье экспресс-методов большее внимание уделено методу экспериментального определения группы негорючих твердых веществ и материалов и энергодисперсионному рентгенофлуоресцентному методу.

**Ключевые слова:** рентгенофлуоресцентный анализ, каротаж, сульфидная пыль, взрывопожароопасность, арсениды, химически связанная сера и мышьяк, полиметаллическая руда, токсикологическая и взрывопожарная опасность, взрыв пыли, эндогенная опасность.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год № FSRW-2020-0014.

**Для цитирования:** 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.

### Methodological approach to the need to assess the explosion and fire hazard properties of sulfide-containing polymetallic ores

V. A. Rodionov<sup>1</sup>, G. N. Karpov<sup>1</sup>, A. V. Leisle<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

**Abstract:** The article discusses a methodological approach to the rapid assessment of toxicological and explosion-fire (endogenous) hazards in the process of mining operations associated with the extraction of sulfide polymetallic ore containing, first of all, chemically bound arsenic and sulfur, without the use of high-tech material and technical support and highly qualified scientific technical staff. A brief overview of the problem of the occurrence of toxicological and explosion-fire hazards arising in the process of mining operations associated with the extraction of such ores is given. It is shown that, despite all the measures and actions taken to prevent the occurrence of toxicological, endogenous and explosive hazards (explosion of sulfide dust) arising in the process of mining these ores, the problem of express assessment of the hazardous properties of rock mass is urgent. Purpose of the article: to analyze the methods that can be applied as express methods for assessing the hazardous properties of ore materials during their direct extraction in the mine and to propose options for how this or that express method can be implemented by a company that extracts polymetallic ores, directly at the face or in the shortest possible time without the use of highly scientific equipment. As the express methods considered in the article, more attention is paid to the method of experimental determination of the group of non-combustible solids and materials and the energy-dispersive X-ray fluorescence method.

**Key words:** X-ray fluorescence analysis, logging, sulfide dust, chemically bound sulfur and arsenic, polymetallic ore, toxicological and explosion-fire hazard, dust explosion, endogenous hazard.

**Acknowledgments:** The study was carried out at the expense of a subsidy for the fulfillment of the state task in the field of scientific activity for 2021 No. FSRW-2020-0014.

**For citation:** 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;(6–1):198–213. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_198.

## Введение

Изменение геологических, горно-технических и природно-климатических условий освоения обрабатываемых и перспективных месторождений, усложнение геомеханической ситуации, увеличение масштабов производства, применение инновационных технологий проходческих и буровзрывных работ, возрастающие потребности в горнорудном полиметаллическом сырье диктуют необходимость совершенствования действующих норм и правил, регламентирующих вопросы промышленной безопасности, и прежде всего — конкретизации разделов по обеспечению промышленной безопасности при добыче серосодержащих полиметаллических руд. Кроме того, такая потребность продиктована увеличением в общем количестве пыли ее мелкодисперсной составляющей, а также вовлечением в разработку

более глубоко расположенных сложно-составных сульфидных руд [1,2].

Необходимость поиска новых решений по повышению промышленной безопасности, а именно разработки методов профилактики процессов самовозгорания и взрыва, инновационных методов комплексного мониторинга пространства горных выработок, и прежде всего забоя (участков очистных работ), подтверждается не только российскими учеными, но и их зарубежными коллегами в работах [3,4], а также в *Safety management of underground combustible sulphide dust (Guideline. Department of Industry and Resources / MOSHAB)*.

Необходимо отметить, что согласно классификации International Mineralogical Association минералы, содержащие мышьяк (As), селен (Se), теллур (Te), сурьму (Sb) и висмут (Bi), но не содержащие серу, все равно при-

нято относить к сульфидным минералам [1,5,6].

На наш взгляд, это в корне неверно, поскольку вносит разногласия между токсикологической составляющей и взрывопожароопасной составляющей. Повышенное внимание уделяется борьбе с эндогенными возгораниями сульфидных (серосодержащих) руд, а также профилактике взрыва сульфидной пыли, в то время как токсикологическая опасность низкотемпературного окисления мышьяксодержащих руд по отношению к серосодержащим рудам, согласно Department of health and human services NIOSH Pocket guide to chemical hazards ((DHHS (NIOSH) Publication No. 2005 – 149), на порядок выше [7,8].

Именно поэтому в настоящей статье предпринята попытка разработать методологический подход к оценке необходимости определения взрывопожароопасных свойств экспресс-методом, который бы позволил учитывать вышестоящие проблемы. На основе собственного опыта авторов статьи и анализа литературных источников мы выделили пять методов, которые в той или иной степени отвечают поставленной цели исследования и поэтому вошли в рассматриваемую методологию научного исследования.

#### **Методология исследования: материалы и методы**

Методологию научного исследования составили следующие методы, позволяющие так или иначе определить наличие в том или ином виде и количестве серу и мышьяк в исследуемых образцах полиметаллической породы, представленной для исследования:

1. Геофизические методы (каротаж скважин и опробование керна).

2. Синхронный термический анализ.

3. Органолептические методы.

4. Метод экспериментального определения группы негорючих твердых веществ и материалов.

5. Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный метод (X-RAY) [1,9,10].

В настоящее время в группу *геофизических методов*, в зависимости от применяемого оборудования и реализуемых методов каротажа, согласно «Инструкции по проведению геофизических исследований рудных скважин», входят: электрический, электромагнитный и магнитный каротаж, ядерно-геофизический каротаж и акустический каротаж [2,11,12].

Всего в группу геофизических методов каротажа объединено около 35 методов исследования горных пород, только ядерно-геофизических методов каротажа более 15 [12 – 14].

На основании вышеизложенного можно сделать закономерный вывод, что данные методы требуют специального оборудования и узкоспециализированного научно-технического персонала, который выполняет поставленные задачи на стадиях поисковых работ, оценки месторождений, разведки месторождений и эксплуатационной разведки месторождений [15,16]. Поэтому данные геофизические методы каротажа не являются экспресс-методами, которые может применить горно-технический персонал рудника в процессе добычи руды, и в дальнейшем мы их не рассматриваем.

*Синхронный термический анализ (СТА)* относится к высоконаучным аналитическим методам исследования термохимических превращений в веществе при его деструкции в окислительной или инертной среде. Он сочетает в себе методы термогравиметрического (ТГ), дифференциально-термогравиметрического (ДТГ) и диф-

ференциально-термического (ДТА) видов анализа (ТГ+ДТГ+ДТА), т.е. одновременно выполняется три вида исследования с одной пробой образца [12,15,16]. При необходимости метод ДТА может быть заменен методом дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК), т. е. можно выполнять ТГ+ДТГ+ДТА или ТГ+ДТГ+ДСК виды анализа образца. Авторы исследовали образцы горной породы на STA 449 F3 Jupiter, работающем под управлением программного пакета NETZSCH Proteus Thermal Analysis. Для овладения методикой работы на данном оборудовании необходимо пройти специальное обучение, кроме того, для интерпретации полученных результатов также желательно наличие специальных знаний в области пробоподготовки, а также термохимии и термодинамики процессов пиролиза горных пород. С учетом того, что для выполнения СТА необходимо наличие специальной лаборатории и лаборанта для работы на STA 449 F3 Jupiter, а также в связи с вероятным отсутствием возможности размещения такого лабораторного комплекса непосредственно рядом с рудником, способ оценки опасных свойств горных пород относящихся к классу сульфидов, с помощью СТА в данной статье также не рассматривается как неудовлетворяющий поставленной цели. Тем не менее на основании полученных результатов считаем, что данный метод может быть применен в качестве экспресс-метода оценки взрывопожароопасных свойств горных пород, содержащих химически связанные мышьяк и серу.

*Органолептические методы*, безусловно, являются мгновенными методами оценки окружающей атмосферы (воздушного пространства горной выработки), но имеют один существенный недостаток: они не позволяют оценить даже примерную концентра-

цию токсичных веществ, в нашем случае в пространстве горных выработок, а также при превышении предельно допустимых концентраций могут представлять опасность для жизни исследователя [17,18,19].

Появление специфических запахов в процессе нормального ведения горнопроходческих работ может свидетельствовать как о необходимости экстренного контроля воздушной среды, так и об определении наличия эндогенных очагов окисления руды, содержащей химически связанные мышьяк или серу.

Очень часто при ведении горных работ по добыче сульфидных или полиметаллических руд, содержащих химически связанные серу и мышьяк, особенно с применением взрывных способов отбойки горнопородной массы, уделяется внимание только вопросам наличия серы в том или ином виде, а про наличие химически связанного мышьяка «забывают». Данный, неправильный с точки зрения токсикологии, факт объясняется принятыми IMA (International Mineralogical Association) правилами, по которым определенные горные породы, независимо от того, содержат они в своем составе химически связанную серу или нет, принято относить к породам сульфидного класса.

Необходимо, чтобы инженерно-технический персонал рудника, отвечающий за безопасность, знал, что в том случае, если горные породы разрабатываемого месторождения содержат не только химически связанную серу, но и химически связанный мышьяк, нужен особый контроль атмосферы горных выработок [10, 20,21].

В этих условиях, особенно при взрывной отбойке, нельзя исключать появления высокотоксичных веществ, начиная от образования мышьяка в чистом виде

(особенно токсикологически опасна его  $\gamma$ -аллотропная модификация) до его различных соединений, среди которых наиболее опасны соединения, образованные  $As^{+3}$ -формой. Кроме того, по характерному запаху чеснока можно однозначно утверждать о протекающих низкотемпературных эндогенных процессах окисления горных пород, содержащих мышьяк.

Горные породы, содержащие химически связанную серу, как было показано выше, представляют взрывопожарную опасность при содержании серы более 15%, поэтому при появлении соответствующих сигнальных запахов необходимо выявить и ликвидировать эндогенные очаги горения сульфидных пород и только потом производить отбойку взрывом руды на разрабатываемом участке.

Таким образом, с учетом вышеизложенного считаем, что органолептические методы являются вспомогательными, способными только выявить имеющиеся проблемы, как токсикологическую, так и взрывопожароопасную, и использовать их нужно только при возникновении необходимости применения специализированных средств индивидуальной защиты горнорабочих.

Методом, позволяющим оценить взрывопожарную опасность веществ и материалов, в том числе и горючесть горных пород, является метод экспериментального определения группы негорючих твердых веществ и материалов, описанный в OSSH «Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination» (ГОСТ 12.1.044 – 89\*).

Вещества и материалы (горные породы) относят к негорючим, если они удовлетворяют определенным критериям в условиях специальных,

стандартных испытаний, описанных в ГОСТ 12.1.044.

На практике установка, предназначенная для определения группы горючести, может быть заменена простой муфельной печью (термостатом), главное, чтобы был обеспечен указанный в методике температурный режим.

При работе по данному методу не требуется ни специальное наукоемкое оборудование, ни специально обученный инженерно-технический персонал. Данный метод полностью удовлетворяет поставленной цели исследования и более подробно будет описан ниже.

Одним из перспективных и уже применяемых на ряде горнопромышленных объектов методов оценки элементного состава добываемого сырья является *метод рентгенофлуоресцентного анализа* [22,23,24]. Появившееся за последние десятилетия материально-техническое обеспечение и программное обеспечение к нему позволяют применять данный метод непосредственно на рабочем месте, в пространстве горных выработок рудника. Образцы исследовали с помощью двух спектрометров: ручной (переносной) спектрометр NITON XL2 и стационарный X-SPEC-50H. Устройство, принцип работы и способ визуализации данных не представляет сложности для современного горного инженера или квалифицированного горнорабочего. Данный метод, на наш взгляд, является самым целесообразным для выбора экспресс-метода согласно поставленной цели, так как позволит на основе полученных данных по содержанию пиритной серы в горном массиве скорректировать дальнейший процесс добычи полезной руды и разработать дополнительные профилактические меры, направленные на предотвращение как самовозгорания отбитой горнопородной массы,

так и взрыва сульфидсодержащей породной пыли. Поэтому данный метод более подробно рассмотрен в настоящей статье.

В настоящее время однозначно сказать, какой из приборов, предназначенных для выполнения РФА, лучше, нельзя, так как это будет зависеть прежде всего от целей его использования. В нашем случае оба прибора показали себя хорошо, однако нам было более удобно работать с NITON XL2. Основные результаты получены на NITON XL2. Он предназначен для измерения неразрушающим методом массовой доли химических элементов в веществах и материалах, находящихся в твёрдом, порошкообразном или жидком состоянии. Thermo Scientific NITON XL2 имеет встроенный компьютер, который работает под управлением промышленной операционной системы Nucleus RTOS. Кроме того, для исследования состава горнорудных материалов у него имеется специализированная база. В зависимости от поставленных задач оба прибора могут детектировать элементы при работе в режиме исследования от 5 секунд [4, 21].

Для работы на X-SPEC-50H осуществляли пробоподготовку. Она заключалась в размоле монолитного образца до размера частиц менее 50 мкм. Затем из полученного порошкообразного образца путем прессова-

ния изготавливали таблетку для исследований. При работе на NITON XL2 использовали как цельные куски горной породы, керн и шлифы (рис. 1), так и диспергированную объединенную пробу с размером частиц не более 100 мкм.

При проведении РФА исследовали как большие куски горной породы, керн и шлифы (см. рис. 1), так и представительную пробу.

### Материалы (образцы) для исследований

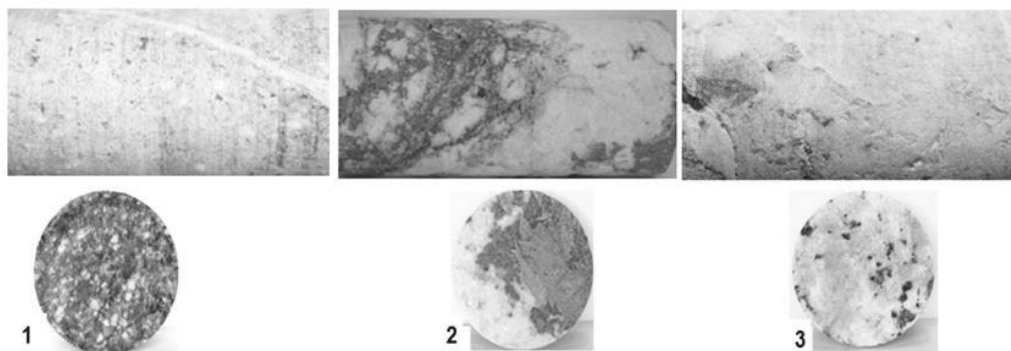
Образцы для исследования были отобраны с трех рабочих горизонтов одного из полиметаллических рудных месторождений России. Рудное тело имеет неоднородную слоистую структуру, в которой в широком диапазоне встречаются серосодержащие и мышьяксодержащие горные породы, приведенные в табл. 1.

Таким образом, при определении возможности применения метода РФА в качестве экспресс-метода оценки содержания опасных компонентов в рудном теле с каждого из горизонтов непосредственно из очистного забоя были отобраны 12 групп образцов. Общий вес каждой группы составлял от 15 до 20 кг. В каждой группе были крупные куски породы, не менее 5 кг один образец из группы свежесбитой породной массы. После про-

Таблица 1

Содержание серы и мышьяка в типичных сульфидных минералах  
Table 1. Sulfur and arsenic content in typical sulfide minerals

Минерал	Химическая формула	Содержание	
		серы, %	мышьяка, %
Пирит	FeS <sub>2</sub>	53.3	—
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	34.9	—
Сфалерит	ZnS	32.9	—
Галенит	PbS	13.4	—
Арсенопирит	FeAsS	19.6	46,0
Лёллингит	FeAs <sub>2</sub>	—	72,82



*Рис. 1. КERN и спилы образцов исследуемого рудного тела: 1 – туф липаритовый; 2 и 3 – кварцевые метасоматиты с арсенопиритом и турмалином (получено авторами)*  
*Fig. 1. Core and cut samples of the ore body under study: 1-liparite tuff; 2 and 3-metasomatic quartz, with arsenopyrite and tourmaline (received by the authors)*

ведения РФА из наиболее крупных кусков выпиливался керна, из которого получали несколько спилов. После внешнего визуального и оптического осмотра керна и спилов образцы отсортировали. Оптический осмотр керна и спилов из него осуществляли методом анализа фотоснимков образцов, полученных с помощью фотоаппарата Sony  $\alpha 5000$ , оборудованного штатным макрообъективом. В результате нами были выделены три наиболее характерные группы. В качестве примера на рис. 1 показан керна и спилов образцов исследуемого рудного тела.

Геометрические характеристики образцов: керна – высота образца  $0,1$  м и диаметр  $4 \cdot 10^{-2}$  м; спил керна – диаметр  $4 \cdot 10^{-2}$  м, и толщина (высота образца)  $5 \cdot 10^{-3}$  м.

Полученные образцы керна, и прежде всего спилов, подтвердили неоднородность рудного тела. Это позволило сделать вывод о том, что в качестве образцов для РФА-анализа нужно брать породную пыль, образующуюся при вбуривании шпура или породную массу при его дальнейшей углубке. В том случае, если такой возможности по тем или иным причинам нет, нужно всесторонне изучить в большем коли-

честве образцы отбитой горнопородной массы. Дальнейшие РФА-исследования проводили с образцами, диспергированными до фракции  $0-100$  мкм.

### **Результаты и их обсуждение**

Результаты, полученные с помощью метода экспериментального определения группы негорючих твердых веществ и материалов, позволяют утверждать, что все исследованные образцы вмещающих пород (туф липаритовый) и основного рудного тела, состоящего из оловянно-касситеритовых руд, являются негорючими. Потеря массы группы образцов вмещающих пород не превышала  $1\%$ . Большая потеря массы была у образцов одного из горизонтов, на котором методами РФА было установлено значительное содержание группы сульфидов. Необходимо отметить, что в образцах оловянно-касситеритовых руд среди общей группы сульфидов преобладают арсениды, а именно арсенопирит и лёллингит. Потеря массы данных образцов составила от  $4$  до  $5,5\%$ . Исследованию подверглись следующие виды образцов: крупные куски горнопородной массы, керна, спилов керна и представительная проба каждого

из образцов весом 100 г дисперсностью до 100 мкм. На образцах породы, керна и спилов керна за исключением микротрещин и появления окислов железа на образцах рудного тела и осветления кварцевой составляющей других изменений отмечено не было. Считаем, что данный метод может быть использован как экспресс-метод оценки горючести образцов горных пород. Он не требует ни специального материально-технического обеспечения, ни процессов пробоподготовки, ни высококвалифицированного персонала. Альтернативой данному методу является высоконаучный метод *синхронного термического анализа* (СТА), который позволяет не только отследить потерю массы при термических превращениях в образце, как в окислительной, так и в инертной среде, но позволяет дополнительно оценить кинетику и термодинамику процесса термической деструкции образца.

Некоторые визуализированные результаты СТА-исследования образцов 1 — туф липаритовый — и 3 — кварцевые метасоматиты с арсенопиритом и турмалином — представлены на рис. 2 и 3.

Образцы, состоящие в основном из липаритового туфа, термическим изменениям не подверглись, потеря массы не превысила 1%. Термохимические эффекты, связанные с фазовыми превращениями, были зарегистрированы при достижении температуры более 250 °С.

Наибольшую термическую нестабильность продемонстрировали образцы, в которых были методами РФА установлено максимальное содержание сульфидов.

На рис. 3 представлена термограмма образца, в котором преобладали арсенопирит и лёллингит. Потеря массы составила от 4 до 5,1%. Начало потери массы

ввиду окислительной термодеструкции зарегистрировано около 510 °С.

По данным СТА можно утверждать, что все исследуемые образцы являются негорючими, следовательно, данный участок ведения горных работ безопасен с точки зрения возникновения эндогенных очагов горения и не требует дополнительных профилактических мер при взрывной отбойке горно-породной массы.

С учетом того, что применяли два РФА-прибора: X-SPEC-50H и NITON XL2, полученный результат представлен как в виде спектрограмм и столбчатых диаграмм, так и в виде таблиц.

На рис. 4 представлена спектрограмма образцов кассетеритовой руды.

На одной из спектрограмм показан результат серебросодержащего образца, а на второй спектрограмме четко видно преобладание олова в исследуемом образце. На спектрограммах отсутствуют серосодержащие породы, но видно, что мышьяка в образцах содержится хорошо определяемое спектрографами количество, пик мышьяка равнозначен численному значению пика серебра на нижней спектрограмме.

Согласно результатам РФА, вмещающие породы (преобладает туф липаритовый), независимо от рассматриваемых горизонтов залегания, имеют практически одинаковый элементный состав. Поскольку столбчатая диаграмма, на которой были бы указаны все элементы вмещающей породы, будет неинформативной из-за мелкого масштаба, результаты исследования представили в виде табл. 2.

Полученные нами экспериментальные данные по исследованию методом РФА образцов туфа не противоречат геологическим характеристикам месторождения.

Итоговые результаты РФА по определению элементов в образцах липа-



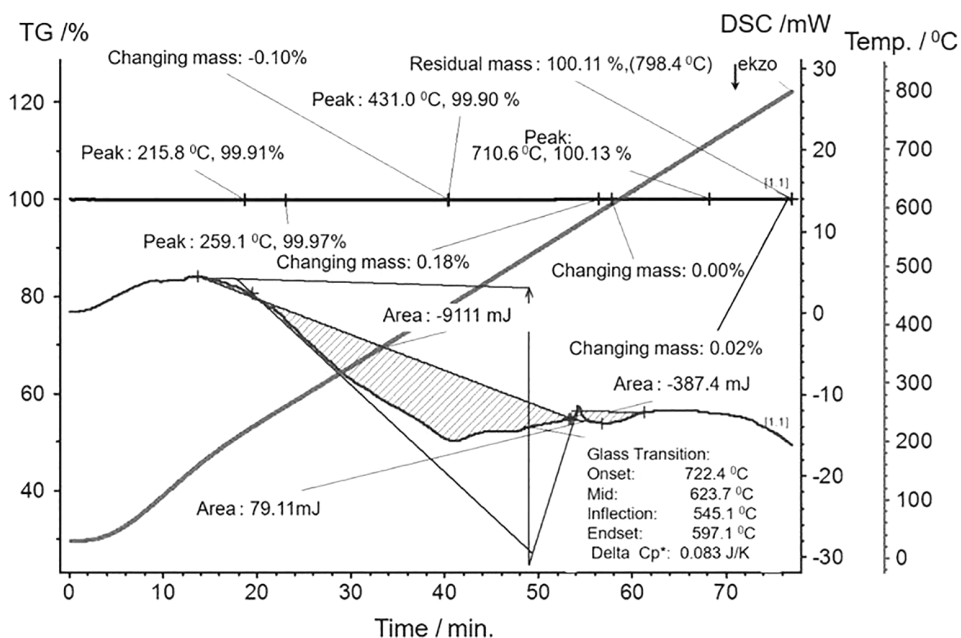


Рис. 2. Результат СТА липаритового туфа (получено авторами)  
 Fig. 2. Shows the result of STA liparite tuff samples (received by the authors)

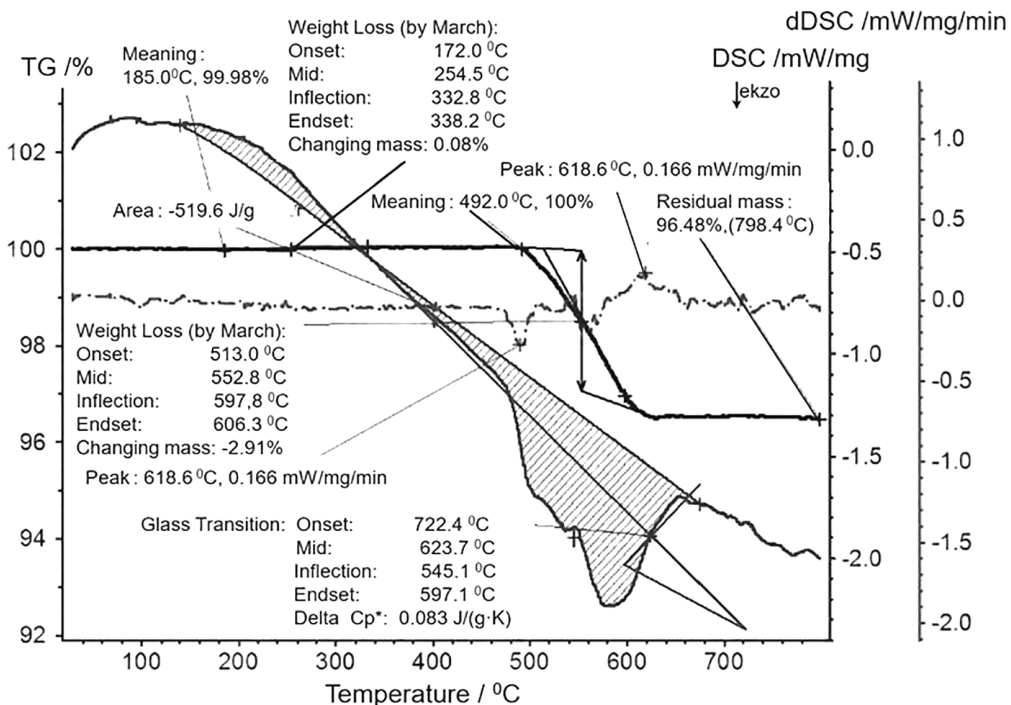


Рис. 3. Результат СТА образца сульфидсодержащей руды с преобладанием арсенопирита и лёлленгита (получено авторами)  
 Fig. 3. Shows the result of STA dominated by arsenopyrite and lellingite (received by the authors)

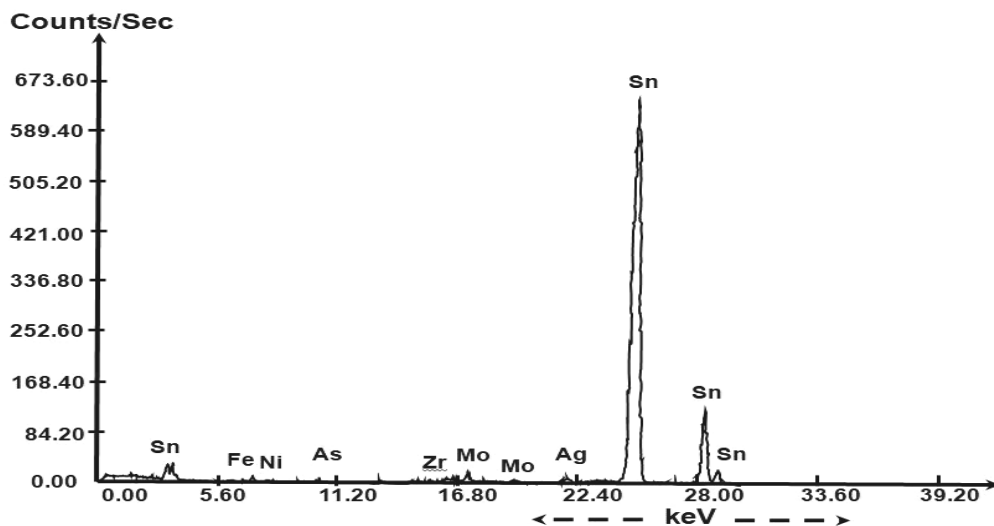
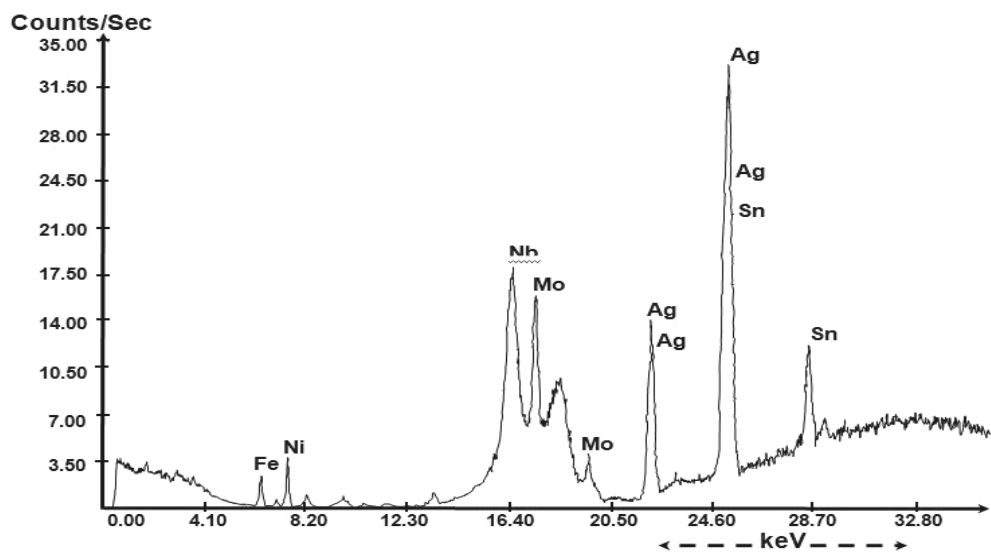


Рис. 4. Спектрограмма образцов касситеритовой руды (получено авторами)

Fig. 4. Spectrogram of cassiterite ore samples (received by the authors)

ритового туфа и кварц метасоматитов с арсенопиритом и турмалином исследуемых групп образцов 1–6 приведены на рис. 5.

Для лучшей визуализации полученных результатов при построении графиков для шкалы концентрации (Y) применяли значения концентрации, выраженные в %. На шкале X – шкале элементов, расположены только

элементы, определенные в результате РФА-исследования пробы.

Образцы 3, 6 и 1 – это соответственно образцы липаритового туфа под номерами 1, 2 и 3, приведенные на рис. 5. Из образцов 1–6 по внешнему виду на образец с повышенным содержанием сульфидов был похож образец № 5. Однако РФА, выполненный спектрометром NITON XL2, пока-

Таблица 2

Результаты РФА-анализа для образцов липаритового туфа 1–3, выраженные в %  
 X-ray method results of the percentage of elements in samples of liparite tuff 1–3

№ образца	Элементный состав образцов, %									
	Ba	Sn	Nb	Zr	Sr	Rb	Bi	As	Pb	Zn
1	0,0408	0,0237	0,0138	0,0187	0,0051	0,0421	0,0014	0,0192	0,0003	0,0301
2	0,0185	0,0004	0,0186	0,0182	0,0106	0,0109	0,0018	0,0018	0,002	0,0057
3	0,0556	0	0,0096	0,0125	0,0109	0,0167	0,0086	0	0,0032	0,0079
№ образца	Cu	Fe	Mn	Ca	K	Al	Si	Cl	S	Mg
1	0,0617	8,7622	0,3276	2,033	2,0354	5,2108	20,927	0,0387	0,0944	0,2071
2	0,0046	1,7017	0,029	1,6942	1,9443	6,6806	33,658	0,0512	0,194	0,0638
3	0,0081	1,2858	0,0383	1,4026	1,823	5,6453	30,204	0,0428	0,025	0

Примечание: значение «0» означает содержание элемента в пределах не менее 1 ppm

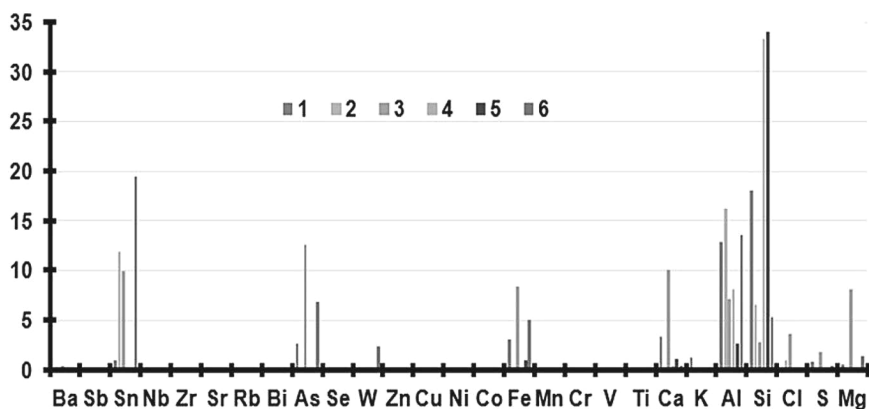
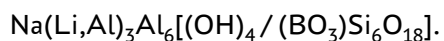


Рис. 5. Результаты РФА-исследования представительной пробы каждого из образцов 1–6 (получено авторами)

Fig. 5. Results of X-ray analysis of a representative sample of each of the samples 1–6 (received by the authors)

зал наличие именно в этом образце максимального содержания Si, минимального содержания S и As, а также наличие широкого спектра металлов (от Sb до Fe и Mn), окислы и/или комплексные соединения которых придают кварцевой составляющей четко выраженный желтый оттенок. Минеральные составляющие породы образцов 1, 3–5, горизонт 1500, и 2, 6, горизонт 1516, в своем составе имеют содержание химически связанной серы (в составе арсенопирита FeAsS) менее 1%. Содержание As колеблется в очень широких

пределах от 0% до 12% и его соединения, основными из которых являются арсенопирит (FeAsS) и леллингит (FeAs<sub>2</sub>), присутствуют как на горизонте 1500, так и на горизонте 1516. Большое количество Al и Si объясняется тем, что вмещающая порода состоит из кварцитов и алюмосиликатов, а также других составляющих горнорудной массы; так, например, турмалин содержащийся в виде вкраплений, имеет следующую брутто формулу:



## **Заключение**

Для ответа на вопрос о необходимости оперативного применения специализированных средств индивидуальной защиты от токсичных продуктов окисления горнопородной массы, содержащей сульфиды, в состав которых входит сера и мышьяк; экспресс-оценки взрывопожарной опасности горнорудных материалов; разработки при необходимости дополнительных профилактических мер защиты при ведении отбойки горнопородной массы взрывным способом на основе анализа применяемых научных методов и литературных данных было проанализировано пять методов. Каждый из методов имеет право свое существование и применение в том или ином случае.

Определено, какие из методов оперативно, без использования наукоемкого оборудования позволят определить степень токсикологической опасности атмосферного воздуха рабочей зоны забоя, эндогенной и/или взрывопожарной опасности.

Считаем, что метод экспериментального определения группы негорючих твердых веществ и материалов является самым простым по материально-техническому обеспечению и получению конечного результата, а также лучшим нормативным экспресс-методом оценки взрывопожарной опасности. Метод выявляет элементного состава породы, но для оценки взрывопожароопасных свойств и ответов на вопросы о вероятности возникновения эндогенных очагов горения или возможности возникновения взрыва пылевоздушного облака, образовавшегося при определенных условиях, он отлично подходит.

Вторым методом, который рекомендуем применять в качестве экспресс-метода оценки как токсикологической, так и взрывопожарной составляющей, является метод энергодисперсионного

рентгенофлуоресцентного анализа. Однако метод РФА ни в одной стране не признан в качестве метода определения как токсикологической, так и взрывопожарной опасности исследуемых веществ. Тем не менее на основании полученных нами данных полагаем его применение целесообразным, и в случае полного отсутствия в образцах горнопородной массы сульфидов или при их содержании в породе менее 10% рекомендуем считать породу невзрывопожароопасной.

Третьим методом, который мы все же относим к экспресс-методам, является метод синхронного термического анализа. К сожалению, данный метод, в отличие от двух предыдущих, требует как дорогостоящего оборудования, так и высококвалифицированных специалистов по работе с оборудованием и интерпретацией полученных данных, т.е. не может быть применен непосредственно на руднике простым инженерно-техническим персоналом. Тем не менее мы рекомендуем его для производственных лабораторий, поскольку его возможности позволяют решать широкий круг производственных задач.

## **Вклад авторов**

*Родионов В. А.* — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

*Карпов Г. Н.* — получение данных для анализа, написание текста статьи, анализ результатов исследования и подготовка данных, выполнение работы по систематизации материала, написание текста статьи.

*Лейсле А. В.* — выполнение работы по систематизации материала, написание текста статьи, надзор и администрирование проекта

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Magomet R., Zhikharev S., Maltsev S., Norina N.* Method of rapid assessment of sulfide sulfur content in host rocks // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 244, 04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124404009.
2. *Gartman A., Findlay A. J., George W. Luther III* Nanoparticulate pyrite and other nanoparticles are a widespread component of hydrothermal vent black smoker emissions // *Chemical Geology*. 2014, vol. 366, pp. 32–41. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.12.013.
3. *Zhang W. D.* In-situ pyrite trace element and sulfur isotope characteristics and metallogenic implications of the Qixiashan Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Eastern China // *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 144, pp. 30–63. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104849.
4. *Ayupova N., Melekestseva I., Maslennikov V., Sadykov S.* Mineralogy and geochemistry of clastic sulfide ores from the Talgan VHMS deposit, South Urals, Russia: Signatures of diagenetic alteration // *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 144. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104839.
5. *Vikentyev I. V., Belogub E. V., Novoselov K. A., Moloshag V. P.* Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals // *Ore Geology Reviews*. 2017, vol. 80, pp. 30–63. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.032.
6. *Prodan M., Lupu L-A., Ghiciori E., Nalboc I., Szollosi-Mota A.* Pyrophoric sulfides influence over the minimum ignition temperature of dust cloud // *AIP Conference Proceedings*. 2017, vol. 1918, 020001. DOI: 10.1063/1.5018496.
7. *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.
8. *Родионов В. А., Турсенев С. А., Скрипник И. Л., Ксенофонтов Ю. Г.* Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменно-угольной пыли // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 246. – С. 617–622. DOI:10.31897/PMI.2020.6.3.
9. *Жихарев С. Я., Родионов В. А., Пухконен Л. В.* Исследование технологических свойств и показателей взрывопожароопасности каменноугольной пыли инновационными методами // *Горный журнал*. – 2018. – № 6. – С. 45–49. DOI:10.17580/gzh.2018.06.09.
10. *Dmitrievich R. M., Alekseevich R. V., Borisovich S. V.* Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2019, vol. 10, iss. 2, pp. 1154–1161, Article ID: IJCIET\_10\_02\_112.
11. *Carson P., Mumford C.* Hazardous Chemicals Handbook. Port Sunlight UK. 2021, 608 p. Available at: URL: <https://rushim.ru/books/labtechnika/hazardous-chemicals-handbook.pdf> (accessed on 21.12.2021).
12. *Bartlett H.* Best Practice in African Mining // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 11, no. 1, pp. 77–83.
13. *Vaughan D. J.* Sulfides. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, Academic Press, Oxford, 2021, pp. 395–412. DOI: 10.1016/B978–0-12–409548–9.02903–1
14. *Haoyuan Dai, Jianchun Fan* Experimental study on ignition mechanisms of wet granulation sulfur caused by friction // *Journal of Hazardous Materials*. 2018, vol. 344, pp. 480–489. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.056.
15. *Pan Ya., Spijker Ch., Raupenstrauch H.* CFD modeling of particle dispersion behavior in the MIKE 3 apparatus // *Alexandria Engineering Journal*. 2022, vol. 61, iss. 12, pp. 9305–9313. DOI: 10.1016/j.aej.2022.03.039.

16. *Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C.* Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia // *Acta Montanistica Slovaca*. 2020, vol. 26 (1), pp. 60–69. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.05.

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

18. *Горинов С. А., Маслов И. Ю.* Возгорание пылевоздушных смесей под действием ударных воздушных волн при подземной добыче колчеданных руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — №12 (специальный выпуск 33). — С. 13–22. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12–33–13–22.

19. *Горинов С. А., Маслов И. Ю.* Физико-математическая модель разогрева сульфидосодержащего включения в аммиачно-селитренное ВВ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 12 (специальный выпуск 33). — С. 3–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12–33–3-12.

20. *Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Митшова Н. А.* Исследование условий и механизма взрыва пылевоздушных смесей в горных выработках при подземной разработке колчеданных месторождений // *Научные основы безопасности горных работ: Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. — М.: ИПКОН РАН. — 2017. — С. 199–206.

21. *Вах А. С., Авченко О. В., Гвоздев В. И., Горячев Н. А., Карабцов А. А., Вах Е. А.* Минералы Pb-As-Sb-S и Cu-Pb-As-Sb-S систем в рудах золото-полиметаллического месторождения «Березитовое» (Верхнее Приамурье, Россия) // *Геология рудных месторождений*. — 2019. — Т. 61. — № 3. — С. 64–84. DOI: 10.31857/S0016–777061364–84.

22. *Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D.* Reduction of Dust in the Longwall Faces of Coal Mines: Problems and Perspective Solutions // *Acta Montanistica Slovaca*. 2021, vol. 26 (1), pp. 84–97. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.07.

23. *Харитонов И. Л., Терёшкин А. И., Корнев А. В., Коршунов Г. И., Корнева М. В.* Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт // *Безопасность труда в промышленности*. — 2019. — № 12. — С. 53–59. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12–53–59.

24. *Романченко С. Б., Нагановский Ю. К., Корнев А. В.* Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 252 (6). — С. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Magomet R., Zhikharev S., Maltsev S., Norina N. Method of rapid assessment of sulfide sulfur content in host rocks. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 244, 04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124404009.

2. Gartman A., Findlay A. J., George W. Luther III Nanoparticulate pyrite and other nanoparticles are a widespread component of hydrothermal vent black smoker emissions. *Chemical Geology*. 2014, vol. 366, pp. 32–41. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.12.013.

3. Zhang W. D. In-situ pyrite trace element and sulfur isotope characteristics and metallogenic implications of the Qixiashan Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 144, pp. 30–63. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104849.

4. Ayupova N., Melekestseva I., Maslennikov V., Sadykov S. Mineralogy and geochemistry of clastic sulfide ores from the Talgan VHMS deposit, South Urals, Russia: Signatures of diagenetic alteration. *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 144. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104839.

5. Vikentyev I. V., Belogub E. V., Novoselov K. A., Moloshag V. P. Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals. *Ore Geology Reviews*. 2017, vol. 80, pp. 30–63. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.032.
6. Prodan M., Lupu L-A., Ghicioi E., Nalboc I., Szollosi-Mota A. Pyrophoric sulfides influence over the minimum ignition temperature of dust cloud. *AIP Conference Proceedings*. 2017, vol. 1918, 020001. DOI: 10.1063/1.5018496.
7. Ryl'nikova M. V., Mitishova N. A. Research technique for explosion hazard of low-grade sulphide ore in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(9):41–51. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09– 0-41 – 51.
8. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Yu. G. Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617–622. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2020.6.3.
9. Dmitrievich R. M., Alekseevich R. V., Borisovich S. V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2019, vol. 10, iss. 2, pp. 1154–1161, Article ID: IJCIET\_10\_02\_112
11. Carson P., Mumford C. Hazardous Chemicals Handbook. Port Sunlight UK. 2021, 608 p. Available at: URL: <https://rushim.ru/books/labtechnika/hazardous-chemicals-handbook.pdf> (accessed on 21.12.2021).
12. Bartlett H. Best Practice in African Mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 11, no. 1, pp. 77–83.
13. Vaughan D. J. Sulfides. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, Academic Press, Oxford, 2021, pp. 395–412. DOI: 10.1016/B978– 0-12– 409548 – 9.02903 – 1
14. Haoyuan Dai, Jianchun Fan Experimental study on ignition mechanisms of wet granulation sulfur caused by friction. *Journal of Hazardous Materials*. 2018, vol. 344, pp. 480–489. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.056.
15. Pan Ya., Spijker Ch., Raupenstrauch H. CFD modeling of particle dispersion behavior in the MIKE 3 apparatus. *Alexandria Engineering Journal*. 2022, vol. 61, iss. 12, pp. 9305 – 9313. DOI: 10.1016/j.aej.2022.03.039.
16. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020, vol. 26 (1), pp. 60–69. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.05.
17. Ermolaev A. I., Teterev N. A. Analysis of research in the field of dust explosions and their prevention in underground mines. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 75–80. [In Russ].
18. Gorinov S. A., Maslov I. Yu. Ignition of dust-air mixtures under the action of air shock waves in underground mining of massive sulfde ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 12 (special issue 33), pp. 13–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12 – 33 – 13 – 22.
19. Gorinov S. A., Maslov I. Yu. Physical and mathematical model of heating of sulfde-bearing inclusions in ammonium nitrate explosives. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 12 (special issue 33), pp. 3–12. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12 – 33 – 3-12.
20. Ryl'nikova M. V., Radchenko D. N., Mitishova N. A. Investigation of the conditions and mechanism of the explosion of dust-air mixtures in the mine workings in underground mining of pyrite deposits. *Scientific foundations of mining safety: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow, IPKON RAN. 2017, pp. 199–206. [In Russ].
21. Vakh A. S., Avchenko O. V., Gvozdev V. I., Goryachev N. A., Karabtsov A. A., Vakh E. A. Minerals of the Pb-As-Sb-S и Cu-Pb-As-Sb-S systems in the ores of berezitovoe gold-polymetallic deposit (Upper Amur region, Russia). *Geology of ore deposits*. 2019, vol. 61, no. 3, pp. 64–84. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0016 – 777061364 – 84.

22. Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D. Reduction of Dust in the Longwall Faces of Coal Mines: Problems and Perspective Solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021, vol. 26 (1), pp. 84–97. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.07.

23. Kharitonov I. L., Tereshkin A. I., Kornev A. V., Korshunov G. I., Korneva M. V. Development of measures on the improvement of dust environment in the coal mines working faces. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2019, no. 12, pp. 53–59. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12 – 53 – 59.

24. Romanchenko S. B., Naganovskiy Y. K., Kornev A. V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Родионов Владимир Алексеевич* — канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности производств, <https://orcid.org/0000-0003-2398-5829> Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: [Rodionov\\_VA@pers.spmi.ru](mailto:Rodionov_VA@pers.spmi.ru);

*Карпов Григорий Николаевич* — канд. техн. наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых <https://orcid.org/0000-0002-3763-2701>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: [Karpov\\_GN@pers.spmi.ru](mailto:Karpov_GN@pers.spmi.ru);

*Лейсле Артем Валерьевич* — канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности производств, <https://orcid.org/0000-0002-2937-268X> Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: [Leisle\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Leisle_AV@pers.spmi.ru).

**Для контактов:** *Родионов Владимир Алексеевич*, e-mail: [Rodionov\\_VA@pers.spmi.ru](mailto:Rodionov_VA@pers.spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Rodionov V. A.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Safety, <https://orcid.org/0000-0003-2398-5829> Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: [Rodionov\\_VA@pers.spmi.ru](mailto:Rodionov_VA@pers.spmi.ru);

*Karpov G. N.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Engineering, <https://orcid.org/0000-0002-3763-2701> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg 199106, Russia; [Karpov\\_GN@pers.spmi.ru](mailto:Karpov_GN@pers.spmi.ru);

*Leisle A. V.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Safety, <https://orcid.org/0000-0002-2937-268X> Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: [Leisle\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Leisle_AV@pers.spmi.ru).

**Corresponding author:** *Rodionov V. A.*, e-mail: [Rodionov\\_VA@pers.spmi.ru](mailto:Rodionov_VA@pers.spmi.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.05.2022.

