

Современное состояние проблемы прогнозирования самовозгорания и взрывчатости сульфидных руд и вмещающих пород на глубине более 1500 м

З.Г. Уфатова

Норильский государственный индустриальный институт, г. Норильск, Российская Федерация

✉ z-ufatowa@yandex.ru

Резюме: Рассмотрены горнотехнические факторы пожароопасности руд при обработке нижних горизонтов северных залежей Октябрьского и Талнахского месторождений. Отмечено, что весьма высока вероятность самонагрева сульфидных руд и склонность к самовозгоранию и взрывчатости сульфидной пыли отдельных участков богатых сульфидных медно-никелевых руд. Сульфидные руды окисляются кислородом из рудничной атмосферы с выделением тепла. В рудничных условиях при скоплении больших объемов отбитой горной массы в течение длительного времени в очистных, подготовительных выработках и при свободном доступе воздуха к навалу рудной массы окисление может сопровождаться интенсивным разогревом руды. При влажности руды и породы 1–4% окисление руды и породы наиболее интенсивно. При разогреве руды выше 35 °С возможны выделения сернистого газа (SO₂). Указаны основные признаки развития окислительных процессов и признаки начальной фазы возможного подземного эндогенного пожара в совокупности с постоянным повышением температуры исходящего из забоя воздуха. В случае обнаружения хотя бы одного из признаков начальной фазы возможного подземного эндогенного пожара принимаются срочные меры по улучшению проветривания данного очистного забоя, обеспечению максимальной интенсивности отгрузки отбитой руды со стороны свежей струи и производится замер содержания сернистого газа, сероводорода и температуры шахтного воздуха через 4 ч. Если по истечении двух суток на исходящей струе снижения содержания сернистого газа и температуры воздуха не наблюдается, то следует считать, что возник эндогенный пожар. Приведены мероприятия по предупреждению, локализации и ликвидации очагов самовозгорания. В качестве дополнительной меры обеспечения безопасности рекомендуется увлажнять пыль, поскольку сульфидная пыль при влажности 9,0–9,5% не взрывается, а при влажности 10% – не передает взрывной импульс.

Ключевые слова: окислительные процессы, пожароопасность, самовозгорание сульфидных руд, сернистый газ, рудничный воздух, горная порода, рудная масса, взрывчатость сульфидной пыли

Для цитирования: Уфатова З.Г. Современное состояние проблемы прогнозирования самовозгорания и взрывчатости сульфидных руд и вмещающих пород на глубине более 1500 м. *Горная промышленность*. 2021;(2):77–80. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-77-80.

The current state of the problem of predicting spontaneous combustion and explosiveness of sulfide ores and host rocks at a depth of more than 1500 m

Z.G. Ufatova

Norilsk State Industrial Institute, Norilsk, Russian Federation

✉ z-ufatowa@yandex.ru

Abstract: The mining factors of ore fire hazard during mining of the lower horizons of the Oktyabrskiy and Talnakhskiy northern deposits are considered. It is noted that the probability of self-heating of sulfide ores and the sulfide dust's tendency to spontaneous combustion and explosiveness in certain sections of rich sulfide copper-nickel ores are quite high. The oxidation of sulfide ores occurs continuously due to the absorption of oxygen from the mine atmosphere and is accompanied by the release of heat. The oxidation can be accompanied by intense heating of the ore in mining conditions, with the accumulation of large volumes of broken rock mass for a long time in treatment and preparation workings and with free access of air to the bulk of the ore mass. The processes of ore and rock oxidation are especially intense when their moisture content is 1–4%. When the ore is heated above 35 °C, sulfur dioxide (SO₂) may be released. The main signs of the above-mentioned oxidative processes' development and signs of the initial phase of a possible underground endogenous fire are indicated along with a constant increase in the temperature of the air coming from the bottom of the face. It is noted that in case of detecting at least one of the signs of a possible underground endogenous fire's initial phase, urgent measures are taken to improve the ventilation of this working face, to ensure maximum intensity of shipped ore from the fresh stream and the content of sulfur dioxide and hydrogen sulfide and mine air temperature are determined every 4 hours. If after two days on the outgoing stream there is no decrease in the content of sulfur dioxide and air temperature, then it should be considered that an endogenous fire has occurred. Measures for the prevention, localization and elimination of foci of spontaneous combustion are given. As an additional safety measure, it is recommended to moisten the dust, since sulfide dust becomes non-explosive at a moisture content of 9–9,5%, and at a humidity of 10% the dust does not transmit an explosive impulse.

Keywords: oxidative processes, fire hazard, spontaneous combustion, sulfide ores, sulfurous gas, mine air, rock, ore mass, sulfide dust explosiveness

For citation: Ufatova Z.G. The current state of the problem of predicting spontaneous combustion and explosiveness of sulfide ores and host rocks at a depth of more than 1500 m. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):77–80. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-77-80.

Введение

Самовозгорание окисляющихся руд определяется следующими физическими условиями: химической активностью руд, притоком к ним воздуха и температурой. При наличии открытой поверхности руды, притока воздуха, содержащего кислород, и накопления тепла в руде рудная масса может достичь критической температуры. Поэтому весьма высока вероятность самонагрева сульфидных руд и склонность к самовозгоранию и взрывчатости сульфидной пыли отдельных участков богатых сульфидных медно-никелевых руд [1–4].

Способ вскрытия месторождения и подготовки выемочных блоков, система ведения очистных работ, а также схема вентиляции и способ проветривания являются главными горнотехническими факторами пожароопасности [5–10].

Влияние глубины разработки на опасность возникновения эндогенного пожара

На основании производственных данных сделан вывод, что с увеличением скорости ведения горных работ пожароопасность уменьшается. Это происходит за счет интенсивной выдачи отбитой горной массы, когда окислительные процессы не успевают развиваться в стенках горных выработок и отбитой руды.

Сплошные сульфидные руды Талнахского рудного узла благоприятствуют развитию окислительных процессов и склонны к самовозгоранию. Из них могут выделяться метан, газы нефтяного происхождения и сероводород. Это обусловлено высокой химической активностью сульфидных руд, проявляющейся в ее слеживаемости и спекаемости, что коренным образом определяется неустойчивостью рудообразующих минералов: пирротина ($Fe_{1-x}S_n$), кубанита ($CuFe_2 S_3$), халькопирита ($CuFeS_2$), пентландита ($[NiFe]_9S_8$), мойхукита ($Cu_9 [FeNi]_9S_{16}$) и др. в присутствии кислорода, содержащегося в рудничном воздухе. Сульфидная руда концентрирует поглощаемый кислород на своей поверхности (абсорбирует кислород), окисляясь при этом и превращаясь в реальный источник подземного эндогенного пожара. Все это должно учитываться при проектировании горных работ ¹.

В Китае для изучения нового метода оценки склонности к самопроизвольному горению различных участков сульфидной рудной массы в качестве экспериментальных материалов были взяты пробы руды из пиритного рудника, а также измерены температурные колебания точек измерения моделируемой рудной массы. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что эволюция температурного поля моделируемой рудной массы имеет значительную пространственную разницу в процессе саморазогрева. Самонагревание сульфидной рудной массы представляет собой хаотический эволюционный процесс, а это означает, что можно оценить тенденцию к самопро-

извольному горению различных областей нелинейным методом анализа. Существует корреляционная связь между максимальным показателем Ляпунова и тенденцией к самопроизвольному горению – коэффициент корреляции составляет 0,9792. Кроме того, вид максимального показателя Ляпунова согласуется с тенденцией к самопроизвольному горению. Поэтому тенденцию к самопроизвольному горению различных площадей в куче сульфидных руд можно оценить с помощью метода максимального показателя Ляпунова [11].

Температура сульфидных руд с глубиной возрастает, а это значит, что окислительные процессы с увеличением глубины разработки будут интенсифицироваться. Одним из основных осложняющих факторов при разработке полезного ископаемого на глубоких горизонтах является высокая температура руд и вмещающих пород. Сульфидные руды проектируемой шахты «Глубокая» (залежи С-5, С-5л, С-6 и С-6л Октябрьского месторождения) залегают на глубинах 1500–1800 м (рис. 1), где температура горных пород достигает +46,9 °C ².

Скорость поглощения (сорбция) кислорода перечисленными выше рудообразующими минералами различна и отражена в табл. 1.

Окисление сульфидных руд происходит непрерывно за счет поглощения кислорода из рудничной атмосферы и сопровождается выделением тепла. Особенно интенсивны процессы окисления руды при влажности от 1 до 4%. В условиях глубоких рудников при свободном продолжительном доступе воздуха к навалу рудной массы окисление может сопровождаться интенсивным разогревом руды. При разогреве руды выше 35 °C возможны выделения сернистого газа (SO_2).

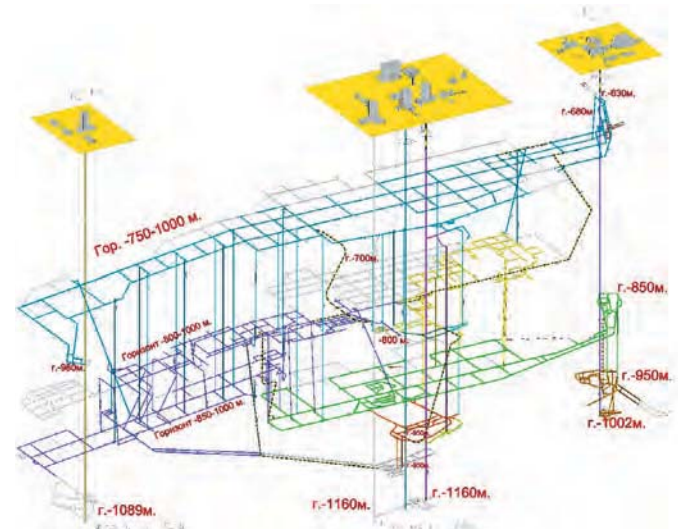


Рис. 1
Объемная модель рудника «Скалистый»

Fig. 1
3D model of the Skalistiy mine

¹ Imperial College London, Self-heating ignition of a natural reagentporous medium. The dissertation is presented in partial execution degree requirements Ph.D in Engineering by Francesco Restuccia, 2017, Led by Dr. Guillermo; НИР «Оценка склонности руд и вмещающих пород к самовозгоранию и взрывчатости при условиях работы на глубинах более 1500 м». Новосибирск-Норильск; 2017.

² НИР «Оценка склонности руд и вмещающих пород к самовозгоранию и взрывчатости при условиях работы на глубинах более 1500 м». Новосибирск-Норильск; 2017.

Таблица 1
Скорость поглощения кислорода рудообразующими минералами (при $t = +23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Table 1
Rate of oxygen uptake by ore-forming minerals (at $t = +23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Наименование руды	Скорость поглощения кислорода, U_{O_2} , $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$
	мин. – макс. сред. (геом.)
Халькопирит-пирротиновый	$0,0010-0,0703$ $0,0102$
Пирротин-кубанитовый	$0,0020-0,0590$ $0,0159$
Кубанит-халькопиритовый	$0,0093-0,0302$ $0,0167$
Пентландит-халькопиритовый	$0,0010-0,0570$ $0,0129$

На большой глубине разработки сульфидные руды изначально имеют более высокую температуру, что, соответственно, сокращает интервал разогрева руды до температуры самовоспламенения и повышает вероятность возникновения эндогенного пожара.

Проведенными на глубоких талнахских рудниках исследованиями установлены следующие признаки развития вышеуказанных окислительных процессов:

- постепенное повышение в горных выработках температуры отбитой руды (окисление), рудничного воздуха и воды;

- постепенное изменение состава рудничной атмосферы в горных выработках, характеризующееся появлением сернистого газа (SO_2) и сероводорода (H_2S) и снижением содержания кислорода (менее 20%);

- постепенное повышение в рудничной воде свободной серной кислоты (H_2SO_4) (свыше $0,2\text{ г/л}$)³.

При интенсивном развитии окислительных процессов данные признаки проявляются в явно выраженной форме и могут быть определены физиологическим воздействием на организм человека.

Признаками начальной фазы возможного подземного эндогенного пожара помимо постоянного повышения температуры исходящего из забоя воздуха являются:

- изменение состава рудничного воздуха в очистных забоях – снижение содержания кислорода (менее 20%) и увеличение содержания углекислоты;

- повышение в забоях температуры отбитой руды ($+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше);

- постепенное увеличение содержания в рудничной воде свободной серной кислоты (свыше $0,2-0,3\text{ г/л}$)⁴ [12];

- устойчивое присутствие в пробах рудничного воздуха при экспресс-анализе и лабораторном исследовании (ВГСЧ), отбираемых в очистных забоях на исходящей из выработки струе воздуха, сернистого газа более 0,00038% по объему, окиси углерода более 0,0017% по объему или сероводорода более 0,00071% по объему, если присутствие этих газов не связано со взрывными работами.

В случае обнаружения хотя бы одного из признаков начальной фазы возможного подземного эндогенного

пожара принимаются срочные меры по улучшению проветривания очистного забоя, обеспечению максимальной интенсивности отгрузки отбитой руды со стороны свежей струи, а через каждые три-четыре часа производится определение содержания сернистого газа, сероводорода и измерение температуры шахтного воздуха. Если по истечении двух суток на исходящей струе снижения содержания сернистого газа и температуры воздуха не наблюдается, то следует считать, что возник эндогенный пожар.

При плохом теплообмене в выработанном пространстве создаются условия для образования очагов самонагревания. При разогревании руды и породы их химическая активность по отношению к кислороду рудничного воздуха возрастает. В очагах самонагревания может произойти самовозгорание.

В зависимости от класса сульфидных руд и вмещающих пород по степени склонности к самовозгоранию, а также горно-геологических условий залегания (мощность и угол падения рудного тела) рудные месторождения делятся на три типа⁵.

Результаты количественного анализа элементного состава единичных образцов богатой руды глубоких северных залежей Октябрьского месторождения (отметка -905 м) в ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН (Приложение М) методом энергодисперсионной спектроскопии аншлифа руды показали, что в отдельных штучных пробах содержание FeS_2 может составлять от 60 до 70%. Остальные минералы – халькопирит CuFeS_2 , FeNiS_2 , Fe_2O_3 . В связи с этим при отработке глубоких залежей Октябрьского и Талнахского месторождений рекомендуется оперативно уточнять содержание серы в рудах, так как при содержании серы в руде более 35% масс. (ГОСТ 8606–93 (ИСО 334-92) шахты, разрабатывающие сульфидные руды с содержанием серы более 35% масс., относятся к категории взрывоопасных.

В настоящее время разработаны профилактические мероприятия по предупреждению самопроизвольного возгорания сульфидных руд и зарядов аммиачно-селитренных ВВ в сульфидных рудах⁶[10; 13; 14].

Выводы

При отработке нижних горизонтов северных залежей Октябрьского и Талнахского месторождений в связи с увеличением глубины разработки сульфидных руд и, соответственно, увеличением изначальной температуры руд весьма высока вероятность самонагревания сульфидных руд и отнесения отдельных участков богатых сульфидных руд к склонным к самовозгоранию и взрывчатости сульфидной пыли. В качестве дополнительной меры обеспечения безопасности необходимо увлажнять отбитую горную массу, содержащую пыль, поскольку согласно ГОСТ 8606–93 сульфидная пыль становится невзрывчатой при достижении влажности 9–9,5%, а при 10% – не передает взрывной импульс.

³ НИР «Оценка склонности руд и вмещающих пород к самовозгоранию и взрывчатости при условиях работы на глубинах более 1500 м». Новосибирск-Норильск; 2017.

⁴ Методические указания по профилактическому заиливанию и тушению подземных эндогенных пожаров на медноколчеданных рудниках Республики Казахстан // Согласованы приказом Комитета по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью Республики Казахстан от «20» августа 2008 года № 33.

⁵ Методические указания по профилактическому заиливанию и тушению подземных эндогенных пожаров на медноколчеданных рудниках Республики Казахстан // Согласованы приказом Комитета по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью Республики Казахстан от «20» августа 2008 года № 33.

⁶ НИР «Оценка склонности руд и вмещающих пород к самовозгоранию и взрывчатости при условиях работы на глубинах более 1500 м». Новосибирск-Норильск; 2017.

Список литературы

1. Fan J.Q., Bai J.P., Zhao Y.S., Yuan W.C., Wang Y.L., Xiang F. Experimental study of factors influencing explosion characteristics of sulfur dust. *China Safety Science Journal*. 2018;28(2):81–86.
2. Thakur P. Learn more about Ignition Temperature, Gas and Dust Explosions. In: Thakur P. *Advanced Mine Ventilation*. Woodhead Publishing; 2019. 528 p.
3. Sun X., Rao Y.Z., Li C., Ma S. Test study on minimum ignition temperature of sulfide ore dust cloud. *Metal Mine*. 2017;6:175–179.
4. Rao Y.Z. *Studies on Mechanism and Control Technology of Sulphide Dust Explosion*. Changsha, China: Central South University; 2018.
5. Wang Y., Sasaki K., Sugai Y., Zhang X. Measurement of critical autoignition temperatures of lowrank of coal piles. 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia; 2014 pp. 339–343 Available at: <https://ro.uow.edu.au/coal/529/>
6. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Марысюк В.П., Наговицин Ю.Н. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива. *Горный журнал*. 2018;(10):101–106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18.
7. Сергунин М.П., Еременко В.А. Определение параметров исходного поля напряженного состояния на руднике «Заполярный». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(4):63–74. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-63-74.
8. Косырева М.А., Еременко В.А., Горбунова Н.Н., Терешин А.А. Расчет параметров крепи выработок с использованием программы Unwedge на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):57–64. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-57-64.
9. Сергунин М.П., Еременко В.А. Обучение нейронной сети предсказывать параметры сдвижения горных пород налегающей толщи на основании данных о трещиноватости массива на примере рудника «Заполярный». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(10):106–116. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-106-116.
10. Ушаков К.З., Каледина Н.О., Киринов Б.Ф., Сребный М.А., Диколенко Е.Я., Ильин А.М., Семенов А.П. *Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело*. 2-е изд. М.: Изд-во МГГУ; 2008. 487 с.
11. Li Z.-J., Deng Y.-X., Chen Z.-F., Yang F.-Q., Liu H. Caking properties detection of sulfide ores based on uniaxial test. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2011;42(2):427–433.
12. Pan W., Wu C., Li Z.-J., Yang Y.-P. Evaluation of spontaneous combustion tendency of sulfide ore heap based on nonlinear parameters. *Journal of Central South University*. 2017;24:2431–2437. DOI: 10.1007/s11771-017-3654-y.
13. Сковчинский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары. М.: Горное дело; 2011. 375 с.
14. Пинаев А.В., Пинаев П.А., Васильев А.А., Прууэл Э.Р., Еременко А.А., Шапошник Ю.Н. Исследование взрывчатости аэрозвесей сульфидных руд при динамическом нагреве. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2018;(2):45–51.

References

1. Fan J.Q., Bai J.P., Zhao Y.S., Yuan W.C., Wang Y.L., Xiang F. Experimental study of factors influencing explosion characteristics of sulfur dust. *China Safety Science Journal*. 2018;28(2):81–86.
2. Thakur P. Learn more about Ignition Temperature, Gas and Dust Explosions. In: Thakur P. *Advanced Mine Ventilation*. Woodhead Publishing; 2019. 528 p.
3. Sun X., Rao Y.Z., Li C., Ma S. Test study on minimum ignition temperature of sulfide ore dust cloud. *Metal Mine*. 2017;6:175–179.
4. Rao Y.Z. *Studies on Mechanism and Control Technology of Sulphide Dust Explosion*. Changsha, China: Central South University; 2018.
5. Wang Y., Sasaki K., Sugai Y., Zhang X. Measurement of critical autoignition temperatures of lowrank of coal piles. 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia; 2014 pp. 339–343 Available at: <https://ro.uow.edu.au/coal/529/>
6. Eremenko V.A., Ainbinder I.I., Marysyuk V.P., Nagovitsyn Yu.N. Guidelines for selecting ground support system for the Talnakh operations based on the rock mass quality assessment. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(10):101–106. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18.
7. Sergunin M.P., Eremenko V.A. Determining parameters of original stress field in rock mass in Zapolyarny mine. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(4):63–74. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-63-74.
8. Kosyreva M.A., Eremenko V.A., Gorbunova N.N., Tereshin A.A. Support design using Unwedge software for mines of Norilsk's polar division. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(8):57–64. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-57-64.
9. Sergunin M.P., Eremenko V.A. Learning of neural network to predict overlying rock mass displacement parameters by the data on jointing in terms of the Zapolyarny mine. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(10):106–116. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-106-116.
10. Ushakov K.Z., Kaledina N.O., Kirin B.F., Srebnyi M.A., Dikolenko E.Ya., Iliin A.M., Semenov A.P. *Mine safety and mine rescue*. 2nd ed. Moscow: Moscow State Mining University; 2008. 487 p. (In Russ.)
11. Li Z.-J., Deng Y.-X., Chen Z.-F., Yang F.-Q., Liu H. Caking properties detection of sulfide ores based on uniaxial test. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2011;42(2):427–433.
12. Pan W., Wu C., Li Z.-J., Yang Y.-P. Evaluation of spontaneous combustion tendency of sulfide ore heap based on nonlinear parameters. *Journal of Central South University*. 2017;24:2431–2437. DOI: 10.1007/s11771-017-3654-y.
13. Skochinsky A.A., Ogievsky V.M. *Mine fires*. Moscow: Gornoe delo; 2011. 375 p. (In Russ.)
14. Pinaev A.V., Pinaev P.A., Vasiliev A.A., Prueel E.R., Yeremenko A.A., Shaposhnik Yu.N. Dynamically heated sulphide ores aerial suspension explosiveness study. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti = Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2018;(2):45–51. (In Russ.)

Информация об авторе

Уфатова Зинаида Георгиевна – доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Норильский государственный индустриальный институт, г. Норильск, Российская Федерация; e-mail: z-ufatowa@yandex.ru.

Information about the author

Zinaida G. Ufatova – Associate Professor at the Mining Department, Norilsk State Industrial Institute, Norilsk, Russian Federation; e-mail: z-ufatowa@yandex.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.03.2021
 Поступила после рецензирования: 03.04.2021
 Принята к публикации: 05.04.2021

Article info

Received: 30.03.2021
 Revised: 03.04.2021
 Accepted: 05.04.2021