

Требования и факторы безопасной отработки месторождений колчеданных руд

М.В. Рыльникова¹ ✉, Г.И. Айнбиндер², Е.Н. Есина¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² ООО «АГЭЦ», г. Москва, Российская Федерация
✉rylnikova@mail.ru

Резюме: Изменение горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождений колчеданных руд, рост масштабов развития окислительных процессов, низкая эффективность применяемых методов локализации процессов горения колчеданных пород в шахтных условиях обуславливают предпочтительность разработки превентивных мер по предупреждению развития окислительных процессов. Выявление факторов, влияющих на вероятность возникновения и интенсивность процессов окисления, а также опыт борьбы с развитием эндогенных процессов свидетельствуют о предпочтительности применения превентивных технологических мер, не допускающих возникновения очагов пожара. Возможность прогнозирования состояния объекта – его экзогенной пожароопасности, склонности к возникновению очага самонагревания и возгорания внешними условиями – геотехнологическими, вентиляционными, аэрогазодинамическими, физико-химическими процессами позволяет осуществлять управление объектом в экологически безопасном режиме.

Ключевые слова: месторождения колчеданных руд, окислительные процессы, промышленная безопасность, требования, факторы, эндогенная пожароопасность

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта №0138-2014-0001 ББФ ИПКОН РАН.

Для цитирования: Рыльникова М.В., Айнбиндер Г.И., Есина Е.Н. Требования и факторы безопасной отработки месторождений колчеданных руд. Горная промышленность. 2020;(2):82–87. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-82-87.

Systematization of technological methods for prevention, containment and elimination of sulfides fire sources

M.V. Rylnikova¹ ✉, G.I. Aynbinder², E.N. Esina¹

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Association of Mining Expertise Centers, Moscow, Russian Federation
✉rylnikova@mail.ru

Abstract: Self-heating and spontaneous combustion of sulfide ores often become a catalyst for global catastrophes resulting in significant material, economic and environmental damages. Despite high level of research, the spontaneous combustion problem of sulfides is still challenging not only in Russia, but also abroad. This is due to the difficulties of timely forecasting, containment and elimination of fire sources. In this regard, systematization of technological methods for prevention, containment and elimination of the sulfides fire sources was carried out, and advantages and significant disadvantages of the existing approaches to solution of the mentioned problem were determined. Analysis for the current state of existing methods relating to containment and elimination of fire sources in sulfide ores revealed a distinctive drawback - there is no set of technological solutions to prevent combustion processes.

Keywords: sulfide ore, spontaneous combustion of sulfide ores, oxidation processes, spontaneous combustion sources, fire containment, prevention, elimination, industrial safety, systematization

Acknowledgements: The work was done as part of Project No.0138-2014-0001 BBF IPKON RAN (Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of RAS).

For citation: Rylnikova M.V., Aynbinder G.I., Esina E.N. Systematization of technological methods for prevention, containment and elimination of sulfides fire sources. Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry. 2020;(2):82–87. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-82-87.

Введение

Актуальность проблемы самовозгорания руд в настоящее время возросла не только в России, но и за рубежом, так как произошли существенные изменения в минерально-сырьевой базе ведущих мировых производителей металлов [1–3].

Самовозгорание полезных ископаемых, руд и углей известно с давних времен и влечет значительные материальные и экономические издержки и экологический ущерб.

Наибольшую известность получили аварии, связанные с взрывами метана и угольной пыли [4–6]. Однако опасности, обусловленные возгоранием отложений рудничной пыли или горением ее аэрозвесей, возможны не только при угледобыче. Ряд руд в своем составе содержит горючие вещества в количестве, достаточном для возникновения в руднике пожаро- и взрывоопасных ситуаций. Причем процесс окисления и самовозгорания сульфидов трудно прогнозировать и не всегда имеется возможность предсказать.

В ключе стратегических для страны задач важнейшая принадлежит месторождениям колчеданных руд цветных (медь, свинец, сурьма, цинк, молибден, никель) и благородных (золото и серебро, платина и платиноиды)¹ [4–5]. Причем доля в минерально-сырьевой базе России этих металлов весьма высока. Определение роли колчеданных месторождений в минерально-сырьевом балансе России диктует необходимость детального рассмотрения геологических факторов, влияющих на безопасность горных работ при подземной и комбинированной разработке месторождений.

При добыче меди в России по геолого-промышленному типу руд 52% составляют сульфидный медно-никелевый тип, 34% – медноколчеданный тип (рис. 1).

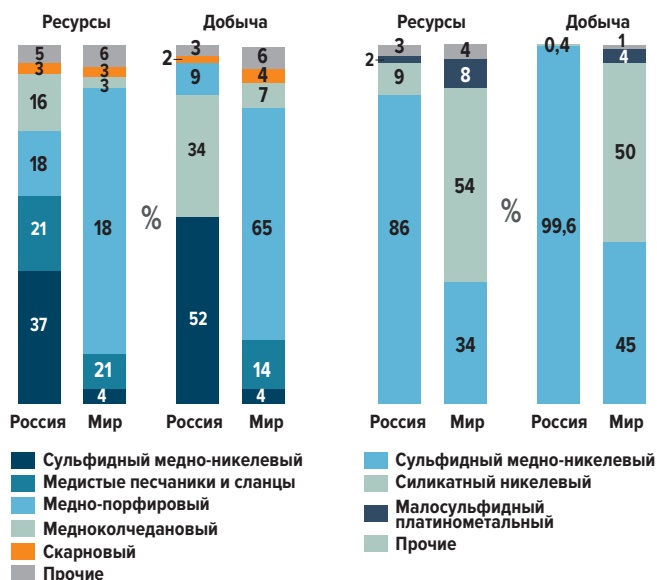


Рис. 1
Распределение ресурсов и добычи меди (I) и никеля (II) в России и в мире по геолого-промышленным типам руд

Fig. 1
Distribution of resources and production of copper (I) and nickel (II) in Russia and worldwide by geological and industrial types of ores

Причем доля сульфидной минерализации в минеральной базе значительно превышает соответствующий показатель по миру. В совокупности по сульфидно-медно-никелевому и медноколчеданному типам руд потенциальная

ресурсная база России составляет 53%. На сегодняшний день в отработку вовлечено менее половины запасов меди страны, что указывает на наличие значительных перспектив увеличения объемов добычи.

Лидирующие позиции России по запасам сульфидных руд, относящихся к числу стратегических для страны природных ресурсов, а также масштабам их извлечения и последующей перспективой добычи требуют обеспечения максимальной безопасности при эксплуатации рудников посредством минимизации процессов самовозгорания сульфидов в техногенно измененном массиве и взрывоопасной сульфидной пыли в рудничной атмосфере с целью исключения развития аварий и инцидентов, а также последствий этих явлений.

Условия возгорания сульфидов при открытой, подземной и комбинированной разработке месторождений

Следует отметить особую значимость месторождений сульфидных руд для нашей страны, поскольку на данный момент и в обозримой перспективе их эксплуатация в полной мере обеспечивает потребность в данном виде минеральных ресурсов за счет собственного производства, что, несомненно, имеет огромное стратегическое значение. Анализ состояния месторождений колчеданных руд в минерально-сырьевом балансе России показал: спрос на указанные виды металлов во всем мире продолжает расти, что связано с объективным развитием научно-технического прогресса, созданием новых технологий и оборудования, систем и средств связи и управления.

Многолетними наблюдениями [1; 6–8] установлены и теоретически обоснованы закономерности и особенности газопроявлений и окислительных процессов при разработке месторождений колчеданных руд:

- приуроченность интенсивных газопритоков в пространстве к отдельным, нередко ограниченным газоносным участкам шахтного поля и выработкам первой очереди проходки – разведочным и осушительным скважинам, капитальным и подготовительным выработкам, а во времени – к выполнению технологических процессов по бурению и отбойке руд и пород;
- зависимость характера и интенсивности газовыделения от типа насыщения (свободные, сорбированные или растворенные газы) и их характеристик (давление и состав флюида, проницаемость и пустотность коллектора);
- высокое дегазирующее воздействие на породный массив выработок первой очереди проходки, приводящее, как правило, к отсутствию или низкой интенсивности выделения газов при очистной выемке.
- окислительные процессы при разработке месторождений колчеданных руд происходят в основном в очистных забоях и смежных выработках, где остались разрушенные колчеданные руды при обеспечении свободного доступа кислорода к ним, в выработанных и обрушенных пространствах, в техногенно измененных массивах, подверженных деформированию с активным раскрытием трещин;
- интенсивность окислительных процессов определяется химической активностью руд и пород, их объемом, доступностью кислорода воздуха и временем контакта с ним реагирующего материала.

В основе самовозгорания лежит окисление кислородом воздуха углей, руды, крепежного материала и других окисляющихся материалов. В процессе окисления химическая энергия угля, руд и других окисляющихся материалов преобразуется в тепловую. Когда образующееся тепло не

¹ Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. <http://www.mnr.gov.ru/>

успевают рассеиваться в окружающем пространстве, то угли, сульфидные руды и другие горючие материалы самовозгораются. К основным признакам тления (горения) руды относятся: повышение температуры массива, появление запаха газа и наличие пара/газа. Могут наблюдаться тепловая дымка и «паровые» шлейфы, а также выцветание руды, свечение, вызванное окислением пирита. Окислительные процессы в рудниках оказывают негативное влияние на состав атмосферы и состояние взаимодействующих с ней материалов: от изменения химической концентрации отдельных элементов до образования новых минералов, растворенных в подземных водах ионов и газообразных соединений.

Требования и факторы пожаробезопасности при отработке месторождений колчеданных руд

Анализ практики самовозгорания колчеданных руд с выявлением факторов, влияющих на вероятность возникновения и интенсивность процессов окисления, а также опыта борьбы с развитием экзогенных процессов свидетельствует о предпочтительности применения превентивных технологических мер, не допускающих возникновения очагов пожара [9–11]. Для этого необходимо установить требования и факторы пожаробезопасности при отработке месторождений колчеданных руд.

Эндогенные пожары возникают в колчеданных рудниках при взаимодействии многих факторов, из которых особое значение имеют: присутствие в выработках раздробленного колчедана, сульфидной мелочи и пыли, древесины, иных горючих материалов в условиях, способствующих окислению [12; 13]. Наличие в шахте крепежного леса в контакте с сульфидной мелочью и пылью в старых выработках, подвергающихся горному давлению, где крепежный лес деформируется и расщепляется, а руда измельчается, увеличивая поверхность контакта, повышает интенсивность окислительных процессов. Высокая кислотность рудничных вод, приток воздуха в выработанное пространство из системы рудничной вентиляции, выделяемая теплота при окислении руд, электротехнические токи, образующиеся при контакте между собой минералов с различными удельными электрическими потенциалами, а также при контакте с ВВ, размещенными во взрывных шпурах и скважинах, тепловыделение при реализации геотехнологических процессов, например, при твердении закладочной смеси с формированием местной аккумуляции теплоты, являются благоприятными факторами для повышения интенсивности окислительных процессов. Определенное значение при самовозгорании колчеданных руд имеют термические константы – теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность. Эндогенные пожары возникают в основном при разработке мощных месторождений, с мощностью рудных залежей от 5–10 м и более, так как при разработке маломощных рудных тел тепло, выделяемое при окислении руд, быстро рассеивается в прилегающем породном массиве и не успевает разогреть массив колчеданных руд.

Важно отметить, что процессы окисления и самовозгорания руд, взрывы сульфидной пыли невозможны в массиве геогенного месторождения до начала горных работ. Только обеспечение доступа кислорода, как основного окислителя, деформационные процессы, приводящие к раскрытию трещин, и технологическое воздействие и разрушение колчеданных руд и пород могут повлечь развитие экзотермических реакций.

Современное состояние изученности этих вопросов позволяет сделать вывод о том, что главными факторами, обуславливающими пожаро- и взрывоопасность сульфидов, являются: концентрация сульфидной серы в руде, кислотность (рН) рудничных вод, температурный режим окружающей среды и собственно массива горных пород, морфологические и минералогические типы руд и их текстурно-структурные особенности, наличие тектонической нарушенности массива, гидрогеологическая обстановка, технология ведения буровых и взрывных работ, выемки рудной массы, управление состоянием массива, система вентиляции подземного рудника [14]. Постоянный мониторинг этих показателей и оперативное управление геотехнологическими, геомеханическими и газодинамическими процессами позволяет снизить вероятность самовоспламенения руд, предвидеть и предотвратить развитие экзогенных процессов, оценить масштабы проблемы и выбрать оптимальные превентивные меры по предотвращению, локализации и ликвидации очага самовозгорания.

Как известно, термин «самовозгорание сульфидной руды» описывает физико-химические процессы теплового разгона, который происходит вследствие ускорения экзотермической реакции взаимодействия сульфидной руды и кислорода воздуха, даже в условиях изоляции от окружающей среды. Повышение температуры окружающей среды или рудной залежи является одним из основных факторов, указывающих на очаг возможного самовозгорания. В связи с этим в настоящее время существует множество способов контроля и анализа температурных показателей, применяемых как в отечественной, так и в мировой практике [15–18].

Способы и схемы вскрытия, подготовки и извлечения запасов проветривания, водоотлива, то есть схема распространения совокупности вскрывающихся, подготовительных, очистных, вентиляционных, транспортных и коммуникационных выработок, водоотлива рудника, состояние выработанного пространства и способ управления состоянием массива являются главными факторами устойчивого и безопасного функционирования горнотехнических систем [17–20].

Обобщение и систематизация опыта разработки месторождений газо- и пожароопасных сульфидных полиметаллических, медно-колчеданных и урановых руд с обеспечением регулирования устойчивой подачи в рудник достаточного количества воздуха, управления деформационными и окислительными процессами для снижения пожароопасности позволили сформировать требования к обеспечению безопасности горных работ:

- блоковое вскрытие, подготовка и разработка запасов с независимой схемой вентиляции выработок с предпочтительным применением комбинированного способа проветривания с использованием системы пневмоизоляционных переемычек;

- осуществление полевой подготовки запасов выемочных блоков. Для крупномасштабных месторождений применение полевой подготовки эксплуатационных горизонтов и шахтного поля в целом. Полевая подготовка выемочных участков и блоков значительно снижает проникновение воздуха в выработанное и обрушенное пространство и облегчает изоляцию отработанных и газопожароопасных действующих выемочных участков, очистных и подготовительных забоев и обеспечивает устойчивое проветривание;

- надежное управление величиной депрессионного дав-

ления рудничного воздуха в выемочных участках и шахтном поле (регулирующими устройствами, перемычками);

– способы и схемы проветривания очистных забоев и выемочных участков должны обеспечивать минимальное поступление воздуха в обрушенные пространства. Для рассмотренных выше условий наиболее целесообразно возвратноточное проветривание с дренажными выработками и естественной тягой;

– устанавливаемый режим проветривания очистных забоев и выемочных участков должен обеспечивать как можно меньшую разность давления воздуха поблизости от отработанных и обрушенных пространств и естественных полостей;

– рациональное расположение и принятие конструктивных параметров (с позиции газо-, пожаро- и взрывобезопасности) выработок вскрытия и подготовки запасов выемочных участков, блоков и очистных забоев и их приемы к основным вскрываемым, транспортным и вентиляционным выработкам рудника;

– минимизация деформаций массива колчеданных руд и пород путем твердеющей закладки выработанного пространства при подземной разработке и выполаживании откосов бортов при открытой разработке;

– надежная изоляция выработанного и обрушенного пространства и естественных пустот путем закладки или заиливания; исключение оставления нарушенных колчеданных руд и пород на время, превышающее установленный инкубационный период;

– минимизация размеров выемочных единиц, применение высокопроизводительных технологий для сокращения срока присутствия отбитой руды в выработанном пространстве;

– мониторинг температурного режима рудничной атмосферы и горных пород на контуре выработок и в глубине массива, параметров деформирования массива, характеристик системы вентиляции.

Раскройка при проектировании и освоении газо- и пожароопасных месторождений и зон оруденения на шахтные поля, выемочные участки, блоки с независимым проветриванием выработок и очистных забоев должна осуществляться с учетом основных условий:

– районирование зон оруденения рудного поля с установлением достаточно четких границ тектонической нарушенности (сдвигов, разломов, смятий и др.) вмещающих пород и других факторов;

– выявление при проектировании рациональных способов и схем блокового вскрытия, подготовки и выемки запасов с самостоятельным проветриванием выработок, блоков, выемочных участков и очистных забоев;

– установление возможности рационального размещения промплощадок, транспортных, энергетических, тепловых и других коммуникаций и вспомогательных служб и объектов на поверхности с учетом экологических требований;

– разработка системы мониторинга состояния массива, газовой выделения, температурного режима, параметров системы проветривания.

Только в результате систематического изучения природных и техногенных особенностей каждого склонного к самовозгоранию и газопожароопасного месторождения и систематизации опыта рудодобывающей промышленности мониторинга взаимосвязи деформационных, газогидродинамических и тепловых процессов возможно безопасное и экологическое освоение недр.

Для обоснования и разработки рациональных спосо-

бов и схем вскрытия, подготовки, выбора геотехнологии разработки газоносных и склонных к окислению рудных месторождений и проветривания выработок, выемочных участков и очистных забоев, технологических схем, порядка и последовательности освоения выемочных участков, разработки специальных мероприятий газового режима ведения горных работ необходимо изучение газоносности и химической активности руд и вмещающих пород на стадии разведки и всех этапах освоения месторождений.

Профилактические мероприятия, предотвращающие самовозгорание массива сульфидных руд и пород, делятся на горнотехнические и специальные. К горнотехническим относятся такие, применение которых может исключить пожары: пожаробезопасные способы вскрытия и подготовки шахтных и выемочных полей, системы разработки с полевой подготовкой без обрушения и магазинирования руды, с полной закладкой или заиливанием выработанного пространства недр. Специальные мероприятия предусматривают уменьшение притока воздуха в выработанное пространство и целики, изоляцию целиков и выработанных пространств, профилактическое заиливание отбитой горной массы в выработанных пространствах, выравнивание давления воздуха. К специальным мероприятиям относятся также применение ингибиторов (антипирогенов) и заполнение обрушенных пород и выработанных пространств инертными газами. Важным мероприятием по выявлению самовозгорания сульфидных руд и пород является организация контроля за составом и температурой атмосферы в действующих горных выработках, в изолированном выработанном пространстве и за составом рудничных вод. Профилактика самовозгорания проводится и на складах полезных ископаемых с формированием штабелей, укладываемых на негорючее основание, сокращением сроков хранения, уменьшением углов откоса, укладкой штабелей зимой на ледяную подушку.

Заключение

Опасность возгорания массива горных пород, вызванная самовозгоранием сульфидных руд, создает опасные экологические и экономические проблемы для горнодобывающей промышленности и стала одной из наиболее важных, актуальных и сложно решаемых социальных, экологических и экономических проблем.

Поэтому чрезвычайно важно оценить условия и риски возникновения и развития окислительных процессов в породах месторождений колчеданных руд с разработкой технологических рекомендаций, обеспечивающих превентивное предупреждение, диагностику и своевременное предотвращение самовозгорания сульфидных руд при открытом, подземном и – это наиболее важно и сложно – при комбинированном способе разработки. Только совместное рассмотрение развития физико-химических, геомеханических, газогидродинамических и теплофизических процессов способно решить эти сложные геотехнологические задачи.

Промышленная безопасность освоения запасов месторождений колчеданных руд, склонных к самовозгоранию, основывается на систематизации и учете природных и техногенных особенностей, выявлении факторов, влияющих на вероятность возникновения и интенсивность процессов окисления, применении комплекса превентивных технологических решений по предупреждению процессов самовозгорания и горения.

Список литературы

1. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd edition. Boston: Gulf Professional Publishing; 2003. Available at: <https://www.elsevier.com/books/dust-explosions-in-the-process-industries/eckhoff/978-0-7506-7602-1>.
2. Skjold T., Eckhoff R. Dust explosions in the process industries: research in the twenty-first century. *Chemical Engineering Transactions*. 2016;48:337–342. DOI: 10.3303/CET1648057.
3. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Dust explosions. A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015;98:57–71. DOI: 10.1016/j.psep.2015.06.008.
4. Кондратьев В.Б., Попов В.В., Кедрова В.Г. Глобальный рынок меди. *Горная Промышленность*. 2019;(3):80–87. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-3-145-80-87.
5. Трубецкой К.Н. (ред.) *Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых*. М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН; МедиаМир; 2014.
6. Матвиенко Н.Г., Воронюк А.С. Основы обеспечения безопасности освоения газоносных и склонных к самовозгоранию рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень* (Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка – 2012»). 2012;(S1):160–171. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19121251>.
7. Горбатов В.А., Игишев В.Г., Попов В.Б., Портола В.А., Син А.Ф. *Защита угольных шахт от самовозгорания угля*. Кемерово: Кузбассвузиздат; 2001.
8. Скочинский А.А., Огиевский В.М. *Рудничные пожары*. М.: Горное дело; Киммерийский центр; 2011.
9. Рыльникова М.В., Митишова Н.А. Методика исследований взрывоопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(9):41–51. DOI: 10.25018/02361493-2019-09-0-41-51.
10. Борисков Ф.Ф. Разработка автогенных инновационных методов освоения сульфидсодержащих отходов производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S11):330–339.
11. Горбатов В.А., Игишев В.Г., Попов В.Б., Лебедев А.В., Белавенцев Л.П., Портола В.А., Син А.Ф. *Технологические схемы профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах*. Кемерово: Кузбассвузиздат; 2002.
12. Portola V.A., Krol G.V. Implementation of the method of localization of the endogenous fires from the surface. *advances in geotechnical and structural engineering*. In: *Proceedings of the Fifth China-Russia Symposium on Underground and Building Engineering of City and Mint. Qindao, 2008*. Beijing; 2018. P. 398–400.
13. Boon M. The mechanism of ‘direct’ and ‘indirect’ bacterial oxidation of sulphide minerals. *Hydrometallurgy*. 2001;62(1):67–70. DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00182-7.
14. Борисков Ф.Ф., Аленичев В.М. Разработка ресурсосберегающих геотехнологий на основе использования адекватной информации о природных сульфидных месторождениях и техногенных образованиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(10):256–262.
15. Bochorishvili N., Chikhradze N., Mataradze E., Akhvlediani I., Chikhradze M., Krauthammer Th. New Suppression System of Methane Explosion in Coal Mines. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015;15:720–724. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.102.
16. Chernobai V.I., Moldovan D.V. Model of formation of dust and gases in the explosion chamber of the blasthole charge in sulphur-containing ore. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017;33(1):804–808. Available at: <http://www.icontrolpollution.com/articles/model-of-formation-of-dust-and-gases-in-the-explosionchamber-of-the-blasthole-chargein-sulphurcontaining-ore-?aid=85768>.
17. Iiyas A., Hawboldt K., Khan F. Kinetics and safety analysis of sulfide mineral selfheating. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011;106:53–61. DOI: 10.1007/s10973-011-1621-7
18. Wang H., Xu C., Wu A., Ai C. Inhibition of spontaneous combustion of sulfide ores by thermopile sulfide oxidation. *Minerals Engineering*. 2013;49:61–67. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.05.011.
19. Твердов А.А., Яновский А.Б., Никишичев С.Б., Апелъ Г. Профилактика и ликвидация горения породных отвалов. *Уголь*. 2010;(2):3–6. Режим доступа: <https://imcmontan.ru/files/coal.pdf>.
20. Портола В.А. Особенности тушения очагов самовозгорания угля в шахтах. *Безопасность труда в промышленности*. 2014;(6):42–46. Режим доступа: <https://www.btpnadzor.ru/archive/osobennosti-tusheniya-ochagov-samovozgoraniya-uglya-v-shakhtakh>

References

1. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd edition. Boston: Gulf Professional Publishing; 2003. Available at: <https://www.elsevier.com/books/dust-explosions-in-the-process-industries/eckhoff/978-0-7506-7602-1>.
2. Skjold T., Eckhoff R. Dust explosions in the process industries: research in the twenty-first century. *Chemical Engineering Transactions*. 2016;48:337–342. DOI: 10.3303/CET1648057.
3. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Dust explosions. A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015;98:57–71. DOI: 10.1016/j.psep.2015.06.008.
4. Kondratyev V.B., Popov V.V., Kedrova G.V. Global Copper Market. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2019;(3):80–87. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2019-3-145-80-87.
5. Trubetskoy K.N. (ed.) *Development of resource-saving and resource-replacing geotechnologies for integrated development of mineral deposits*. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources; MediaMir; 2014. (In Russ.)
6. Matvienko N.G., Voronyuk A.C. Basics of ensuring safe development of gas-bearing and prone to spontaneous ignition ore deposits. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*. 2012;(S1):160–171. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19121251>. (In Russ.)
7. Gorbatov V.A., Igishev V.G., Popov V.B., Portola V.A., Sin A.F. *Protection of coal mines from spontaneous coal ignition*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 2001. (In Russ.)
8. Skochinskiy A.A., Ogievskiy V.M. *Mine fires*. Moscow: Gornoe delo; Kimmeriyskiy tsentr; 2011. (In Russ.)

9. Rylnikova M. V., Mitishova N. A. Research technique for explosion hazard of low-grade sulphide ore in underground mines. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*. 2019;(9):41–51. (In Russ.) DOI: 10.25018/02361493-2019-09-0-41-51.
10. Boriskov F.F. Working of autogenous innovative methods of development of sulphide-bearing wasters of production. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*. 2011;(S11):330–339. (In Russ.)
11. Gorbатов V.A., Igishev V.G., Popov V.B., Lebedev A.V., Belaventsev L.P., Portola V.A., Sin A.F. *Technological flow sheets for prevention, localization and extinguishing of endogenous fires in coal mines*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 2002. (In Russ.)
12. Portola V.A., Krol G.V. Implementation of the method of localization of the endogenous fires from the surface. advances in geotechnical and structural engineering. In: *Proceedings of the Fifth China-Russia Symposium on Underground and Building Engineering of City and Mint. Qindao, 2008*. Beijing; 2018. P. 398–400.
13. Boon M. The mechanism of ‘direct’ and ‘indirect’ bacterial oxidation of sulphide minerals. *Hydrometallurgy*. 2001;62(1):67–70. DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00182-7.
14. Boriskov F.F., Alenichev V.M. Development of resource-saving technologies based on adequate data on content of natural sulfides in technogenic deposits. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*. 2015;(10):256–262. (In Russ.)
15. Bochorishvili N., Chikhradze N., Mataradze E., Akhvlediani I., Chikhradze M., Krauthammer Th. New Suppression System of Methane Explosion in Coal Mines. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015;15:720–724. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.102.
16. Chernobai V.I., Moldovan D.V. Model of formation of dust and gases in the explosion chamber of the blasthole charge in sulphur-containing ore. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017;33(1):804–808. Available at: <http://www.icontrolpollution.com/articles/model-of-formation-of-dust-and-gases-in-the-explosionchamber-of-the-blasthole-chargein-sulphurcontaining-ore-.php?aid=85768>.
17. Iliyasa A., Hawboldt K., Khan F. Kinetics and safety analysis of sulfide mineral selfheating. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011;106:53–61. DOI: 10.1007/s10973-011-1621-7
18. Wang H., Xu C., Wu A., Ai C. Inhibition of spontaneous combustion of sulfide ores by thermopile sulfide oxidation. *Minerals Engineering*. 2013;49:61–67. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.05.011.
19. Tverdov A.A., Yanovskiy A.B., Nikishichev S.B., Apel G. Prevention and elimination of dump combustion. *Ugol'*. 2010;(2):3–6. Available at: <https://imcmontan.ru/files/coal.pdf>.
20. Portola V.A. Peculiarities of extinguishing place of spontaneous combustion in coal mines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2014;(6):42–46. Available at: <https://www.btpnadzor.ru/archive/osobennosti-tusheniya-ochagov-samovozgoraniya-uglya-v-shakhtakh>.

Информация об авторах

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теории проектирования освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: rylnikova@mail.ru.

Айнбиндер Геннадий Игоревич – генеральный директор, ООО «АГЭЦ», г. Москва, Российская Федерация.

Есина Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.03.2020

Поступила после рецензирования: 19.03.2020

Принята к публикации: 30.03.2020

Information about the author

Marina V. Rylnikova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: rylnikova@mail.ru.

Gennady I. Aynbinder – Chief Executive Officer, Association of Mining Expertise Centers, Moscow, Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: agec@agec.ru.

Ekaterina N. Esina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: esina555@list.ru.

Article info

Received: 05.03.2020

Revised: 19.03.2020

Accepted: 30.03.2020