УДК 622.831

Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий

В.Л.ТРУШКО✉, О.В.ТРУШКО

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Трушко В.Л. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий / В.Л.Трушко, О.В.Трушко // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 569-577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современного состояния железорудной базы черной металлургии России и мира, выделены крупнейшие железорудные провинции и производители железной руды. Выявлены перспективные направления развития и повышения качества железорудной базы России и особенности освоения новых месторождений богатых железных руд. Предложены эффективные технологии разработки месторождений богатых железных руд, обеспечивающие увеличение объемов добычи. Выполнено геомеханическое обоснование рациональных технологических параметров, которые легко адаптируются к изменениям горно-геологических условий.

На основе результатов натурных исследований обосновано применение упруго-пластической модели с критерием прочности Кулона – Мора для моделирования изменения напряженно-деформированного состояния рудного массива при ведении горных работ и разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости горных выработок.

Представлены эффективные инженерно-технические решения комплексного освоения и глубокой переработки богатых железных руд с получением фракционированной аглоруды, повышающей эффективность металлургических процессов, производством высокосортных железисто-окисных пигментов и железорудных брикетов, повышающих конкурентоспособность железорудных компаний и полноту использования ресурсного потенциала месторождений.

Ключевые слова: железная руда; освоение месторождений; разработка; геомеханическое обоснование; глубокая переработка сырья

Введение. В 98 странах имеются месторождения железных руд с прогнозными ресурсами 790,9 млрд т. Оцененные запасы составляют 464,24 млрд т, а подтвержденные запасы – 206,9 млрд т [2, 4].

По данным геологической службы США (USGS) в 2019 г. мировая добыча железной руды составила 2,5 млрд т. Крупнейшими производителями железорудного сырья являются Австралия, Бразилия и Китай, Россия занимает пятое место (Австралия – 930, Бразилия – 480, Китай – 350, Индия – 210, Россия – 99 млн т). На рис.1 представлены страны с добычей более 1 млн т.

Рис.1. Добыча железных руд

Рис.2. Экспорт (1) и импорт (2) железных руд

Крупнейшие производители железной руды (Китай, Бразилия, Австралия) добывают 65 % от мирового объема производства, доля России составляет 5,7 % (рис.2). На долю бедных и средних по качеству руд с содержанием железа 16-40 % приходится 87,5 % разведанных запасов [7, 8, 21].

В Австралии с запасами 32,2 млрд т (10,4 % от мировых) 90 % железной руды сосредоточено в провинциях Пилбара и Хамерсли, месторождения которых разрабатываются открытым способом с высоким качеством руды (от 55 до 64 % железа). Ведущие компании BHP Billiton и Rio Tinto, разрабатывающие рудники Парабурду, Маунт-Уэйлбек, Маунт-Том-Прайс, имеют 16 железорудных месторождений, 4 портовых терминала и железнодорожную сеть длиной 1700 км. BHP Billiton имеет основные активы в Западной Австралии. В частности, комплекс WAIO включает в себя 5 рудников и 4 перерабатывающих предприятия.

Бразилия имеет запасы 17 млрд т (6,4 % от мировых) с центрами добычи Каражас и Итабира и крупными месторождениями Пику-ди-Итабириту, Тимпопеба, Консейсан. Основным производителем железной руды с высоким содержанием железа (до 60 %) в Бразилии является компания Vale с годовым объемом добычи более 350 млн т.

Китай имеет запасы 9 млрд т (5,2 % от мировых) с основными месторождениями на востоке страны, большая часть из которых относятся к мелким. Разрабатываются более 2 тыс. месторождений с содержанием железа в среднем 32-33 % и повышенным содержанием вредных примесей – фосфора и алюминия. Основные производители железных руд в Китае: Shougang Group, Gangcheng Group, Tangshan Iron & Steel, China Iron, Anshan Iron and Steel Group Corporation [8].

В России запасы железной руды составляют 43 млрд т (16,9 % от мировых), что является наиболее высокими показателями в мире [9]. Богатейшая железорудная провинция в мире – Курская магнитная аномалия включает в себя 4 рудных района: Михайловский, Белгородский, Орловский и Оскольский [10]. На их территории залегают как бедные руды (с содержанием железа 32-38 %), так и богатые (до 68 %). Залежи КМА разрабатывают «Металлоинвест», НЛМК, «Северсталь» и «Комбинат КМАруда». «Металлоинвест» в 2019 г. произвел 40,2 млн т железной руды, 28,1 млн т окатышей и 7,9 млн т ГБЖ/ПВЖ; Стойленский ГОК – 18 млн т концентрата, 1 млн т аглоруды и 7 млн т окатышей; «Комбинат КМАруда» – 4,8 млн т железной руды и 2,1 млн т концентрата.

«Северсталь» владеет на территории КМА Яковлевским месторождением, запасы которого превышают 9 млрд т руды с высоким содержанием железа (до 68 %) и низким процентом серы и фосфора. ГОК выпускает агломерационную и доменную железную руду с объемом добычи 1,5 млн т в 2019 г. К 2023 г. комбинат планирует добывать до 5 млн т руды в год.

Наряду с уникальными месторождениями КМА в России существует еще несколько крупных железорудных провинций. Западно-Сибирский бассейн с общими запасами 2 млрд т, на территории которого выделены Бакcharский, Колпашевский, Парabelьский, Чузикский и Парбигский рудные узлы, разрабатывает 15 месторождений, представленных в основном скарно-магнетитовыми рудами с содержанием железа от 20 до 60 %. В Карелии и Мурманской обл. выделено несколько крупных рудных узлов с суммарными запасами железной руды 2,8 млрд т. Уральский железорудный район с запасами 9,3 млрд т включает Качканарский рудный узел с Гусевогорским и Качканарским месторождениями с общими разведанными запасами свыше 2,9 млрд т. Всего Качканарский ГОК в 2019 г. произвел 57,9 млн т железной руды, 3,5 млн т агломерата и 6,2 млн т окатышей. В Восточно-Сибирском регионе запасы железной руды составляют 5,1 млрд т. На государственный баланс поставлено 14 месторождений, которые в сложившихся рыночных условиях не разрабатываются.

В России ведущими железорудными регионами являются Центрально-Черноземный, Уральский и Западно-Сибирский регионы (рис.3).

Постановка задачи. При достигнутом уровне добычи обеспеченность черной металлургии железной рудой в России составляет более 200 лет, однако распределение железорудных месторождений по регионам неравномерное и имеет особенности, затрудняющие их освоение. Содержание железа в руде на месторождениях России также изменяется в широких пределах. Богатые железные руды (более 60 % железа) составляют в разведанных запасах всего 12,5 %. Поэтому в основном разрабатываются месторождения с бедными рудами (32-38 % железа), производство которых за последние 5 лет увеличивалось на 9 % в год. Несмотря на это, спрос на железную руду опережал предложение, и цены на нее в 2020 г. достигли 118 дол. США за тонну и по темпам роста опередили цены на золото [12].

В сложившихся условиях перспективным направлением увеличения качественной железорудной базы России становится освоение месторождений богатых железных руд КМА с содержанием железа в руде до 68 %. Первым из них начато освоение Яковлевского месторождения с балансовыми запасами 9,6 млрд т, однако его разработка на первом этапе потребовала применения низкопроизводительных слоевых систем с закладкой выработанного пространства, что значительно повысило себестоимость добычи [22]. Это было вызвано сложнейшими горно-геологическими

Рис.3. Запасы железорудного сырья по регионам РФ (категория P₁)

условиями месторождения с низкой прочностью богатых железных руд (менее 1-2 МПа) и высокой пористостью (до 25 %), наличием высоконапорных водоносных горизонтов в налегающей толще и высокими экологическими требованиями в регионе.

Для увеличения производительности очистных горных работ и снижения себестоимости добычи необходимо применение более эффективных технологий разработки с увеличенными геометрическими параметрами очистных выработок [28]. Положительный опыт получен на руднике «Айхал», где переход на камеры полигональной формы позволил увеличить высоту обнажения боков очистных камер в 1,6-1,8 раза при сохранении устойчивости [6, 18]. При переходе на такие технологии требуется геомеханическое обоснование рациональных геометрических параметров очистных выработок, обеспечивающих их устойчивость.

Методология. Для условий Яковлевского рудника разработана технология и выполнено геомеханическое обоснование отработки запасов выработками полигональной формы с шахматным порядком их проведения (Патент № 2248448. Способ разработки мощных крутопадающих залежей слабых руд. Оpubл. 20.03.2005. Бюл. № 8. Патент № 2648371. Способ разработки мощных крутопадающих месторождений неустойчивых руд. Оpubл. 26.03.2018. Бюл. № 9).

Построение геомеханической модели выполнено с учетом естественного поля напряжений в рудном и породном массивах и его изменений при ведении горных работ, прочностных и деформационных свойств вмещающих горных пород и руд и снижения их прочности при увлажнении, влияния закладки и последовательности ведения горных работ [22, 26, 31].

Для минимизации влияния граничных условий на распределение напряжений и деформаций при моделировании различных вариантов отработки запасов рассмотрен участок массива с размерами 750 м по горизонтали и 250 м по вертикали. По вертикали участок мощностью 65 м представлен рудным массивом (предохранительный целик), затем участок 12,5 м – закладочный массив.

На гранях модели приложены напряжения вертикальные $\sigma_y = 7$ МПа и горизонтальные $\sigma_x = 4$ МПа, определенные по результатам экспериментальных исследований [25, 26]. Физико-механические усредненные параметры руд и вмещающих пород определены Горным университетом, ВИОГЕМ и ВНИМИ на основании лабораторных и натурных испытаний (см. таблицу) [19, 26].

По изменениям физико-механических свойств руды разделены на три типа: рыхлые с пористостью более 20 % и пределом прочности на одноосное сжатие 1,0-2,2 МПа, средней плотности с пористостью 16-20 % и пределом прочности до 7 МПа и плотные с пределом прочности до 19 МПа [20]. Рыхлые руды с содержанием железа до 68 % составляют до 60 % общих запасов. Натурные исследования изменения напряженно-деформированного состояния рудного массива и устойчивости обнажений горных выработок при ведении горных работ выявили снижение отпора рудного массива вследствие высокой пористости и склонности руд к уплотнению с развитием пластических деформаций [11, 13, 27].

Основные физико-механические параметры руд Яковлевского месторождения

Параметры	Руда мартитовая			Руда железнослюдково-мартитовая			Руда гидрогематит-мартитовая		
	Рыхлая	Средней плотности (хлоритизированная)	Плотная (карбонатизированная)	Рыхлая	Средней плотности (хлоритизированная)	Плотная (карбонатизированная)	Рыхлая	Средней плотности (глиноподобная, хлоритизированная)	Плотная (глиноподобная, карбонатизированная)
Объемная масса, 10 кН/м ³	3,64	3,38	3,40	3,4	3,4	3,5	3,2	3,3	3,45
Предел прочности на сжатие, МПа	1,03	5,8	20,2	1,25	5,15	16,6	2,15	6,95	19,45
Влажность естественная, %	12,32	5,03	5,53	14,3	3,26	3,8	—	7,96	4,54
Удельное сцепление, МПа	0,55	1,55	5,35	0,45	1,45	4,35	0,65	1,85	5,85
Модуль деформации, 10 ³ МПа	1,53	1,86	2,67	1,85	1,93	2,25	1,75	1,91	2,43
Коэффициент Пуассона	0,28	0,26	0,25	0,26	0,26	0,25	0,28	0,26	0,25
Угол внутреннего трения, град	27,5	35,5	37,5	28,5	36,5	38,5	34,5	35,5	38,5
Пористость, %	21,3	16,4	14,5	20,5	18,85	12,45	25,85	19,35	15,15

Для описания рудного массива принята упругопластическая модель на основе результатов натурных исследований напряженно-деформированного состояния и устойчивости рудного массива при ведении горных работ [21, 23].

Критерием прочности принято условие предельного состояния Кулона – Мора:

$$\tau_c = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi,$$

где τ_c – касательное напряжение сдвига; σ – нормальное напряжение; c – сцепление; φ – угол внутреннего трения.

Численное моделирование выполнено с использованием метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в программном комплексе Simulia Abaqus [30]. Рассмотрено два варианта отработки запасов богатых железных руд в нисходящем порядке полигональными очистными выработками высотой 16 и 12 м при переходе со слоевой системы разработки (рис.4). Формирование полигональных очистных выработок начинается с проведения в их основании выработки высотой 3 м и шириной 4,9 м.

Для комплексного использования ресурсного потенциала с учетом особенностей месторождения рассмотрена организация технологических цепочек глубокой переработки добываемого сырья с получением товарной продукции широкой номенклатуры.

Обсуждение результатов. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния массива железнослюдяково-мартитовых (рыхлых) руд при отработке запасов выработками полигональной формы высотой 12 и 16 м представлены на рис.5 [24].

Установлены зависимости изменения полей вертикальных и горизонтальных напряжений вокруг подготовительных выработок с понижением уровня очистных работ и увеличением мощности закладочного массива (рис.6).

Максимальный коэффициент концентрации вертикальных напряжений отмечен на расстоянии 1-2 м от контура выработки и составляет для второго слоя 2,75, а для горизонтальных напряжений не превышает 1,4. При увеличении мощности закладки уменьшаются величины вертикальных и горизонтальных напряжений в массиве, что приводит к увеличению зоны разгрузки рудного массива и уменьшению размеров зоны предельного состояния вокруг подготовительных выработок.

Переход на технологию выемки запасов плотных железнослюдяково-мартитовых и гидрогематит-мартитовых руд возможен без крепления подготовительных выработок, а в рыхлых и средней плотности рудах требуется проведение мероприятий по обеспечению их устойчивости. Выемка запасов богатых железных руд производится в нисходящем порядке выработками полигональной формы, пройденными вкрест простирания залежи. Смежные этажи смещаются на половину ширины выработок, в кровле которых оставляют недозаклад и формируют вентиляционно-закладочные орты для проветривания камер за счет общешахтной депрессии. После отработки подэтажа производят закладку ортов.

При такой технологии разработки повышается эффективность и безопасность ведения горных работ за счет обеспечения устойчивости подготовленных горных выработок и исключения присутствия рабочих в очистном забое. Уменьшается объем горно-подготовительных работ, снижаются потери и разубоживание руд, упрощается схема вентиляции за счет общешахтной депрессии

Рис.4. Схема очистной выемки руды с высотой выработки 12 м (а); 16 м (б); 1-5 – порядок проведения горных выработок

Рис.5. Распределение полей нормальных максимальных напряжений в рудном массиве и формирование зон предельного состояния при высоте очистных выработок 12 м (а-е) и 16 м (а'-е')
а, б, а', б' – рыхлые руды; в, г, в', г' – руды средней плотности; д, е, д', е' – плотные руды

Рис.6. Зависимость влияния глубины ведения горных работ на изменение величины и коэффициента концентрации вертикальных (1) и горизонтальных (2) напряжений

и отказа от тупиковой схемы. Технология легко адаптируется к изменениям горно-геологических условий и конъюнктуре рынка за счет возможности селективной выемки руды и управления качеством рудопотоков.

В целях повышения конкурентоспособности освоения Яковлевского месторождения разработаны эффективные технологии комплексной переработки железорудного сырья, включающие: производство богатой железом фракционированной аглоруды с высокими комкующими свойствами; тонкое измельчение руды с развитой системой классификации и брикетирование по безобжиговому способу с получением высокосортных пигментов и железорудных брикетов; получение трех типов минеральных вод и смесей слабромагнитных железных руд, используемых в бальнеологических целях.

Экспериментально установлено, что аглоруда Яковлевского месторождения обладает уникальными свойствами, обеспечивая в смеси с концентратом не только увеличение содержания железа в агломерате и снижение вредных примесей, но и улучшение газопроницаемости агломерационной шихты (Патент № 2552218. Способ подготовки агломерационной шихты к спеканию. Оpubл. 10.06.2015. Бюл. № 16).

Увеличение в смеси с концентратом количества фракционированной аглоруды на 10-30 % уменьшает газодинамическое сопротивление шихты в 3-4 раза, открывая возможности коренного увеличения скорости спекания и роста производительности агломерационных машин на 50 %. Более совершенной становится физическая и минеральная структура спека. Повышается прочность агломерата. Полнее выгорает топливо и уменьшается его расход. Производительность доменных печей повышается на 5-10 % с экономией дорогостоящего кокса, что является основой повышения экономической эффективности производства и выпуска высокосортной металлургической продукции [1, 3, 13, 17].

Производство природного железоокисленного пигмента и брикетов из руды предусматривает ее дробление и измельчение, мокрую магнитную сепарацию и ультразвуковую окислительную деструкцию, а затем основную и не менее двух классификаций с получением готового пигмента (Патент № 2476468. Способ переработки железной руды с получением пигмента и брикетов. Оpubл. 27.02.2013. Бюл. № 6. Патент № 2521380. Способ комплексной переработки мартит-гидрогематитовой руды. Оpubл. 27.06.2014. Бюл. № 18). Магнитную фракцию и пески основной классификации брикетируют. Холодное брикетирование руды имеет преимущества перед агломерацией и окускованием: не требует высокотемпературных процессов, дает более высокую прочность и постоянство химического состава брикетов, исключает отходы и обеспечивает лучшую транспортабельность брикетов [25, 26].

Величина чистого дисконтированного дохода при производстве пигмента и железорудных брикетов нарастающим итогом составляет 2745 и 2834 млн руб. соответственно. Дисконтируемый срок окупаемости затрат на производство красного железоокисленного пигмента с начала инвестирования проекта 1,8 и 0,8 года с начала производства брикетов.

Получение трех типов минеральных вод, соответствующих ГОСТ 13273-88 «Воды минеральные лечебные и лечебно-столовые» предусматривается по технологии утилизации дренируемых вод Яковлевского месторождения для последующего использования в лечении широкого спектра желудочно-кишечных болезней и очистки организма от тяжелых металлов и радионуклеидов [5, 14]. Применение минеральных вод лечебных питьевых, для ванн и бассейнов в сочетании с методами магнитобальнеологии на основе смесей слабомангнитных руд позволяет развивать санаторно-курортное лечение.

Использование больших массивов данных о месторождении и показателей технологических процессов в период его освоения с созданием «цифровых двойников» позволяет перейти к цифровой трансформации производства и значительно улучшить технико-экономические показатели железорудных предприятий [29].

Заключение. Перспективными направлениями технологического развития и повышения конкурентоспособности железорудной отрасли представляются переход на цифровые технологии, наиболее полное использование ресурсного потенциала месторождений с высоким содержанием железа в руде и комплексная глубокая переработка железорудного сырья с выпуском товарной продукции.

Реализация концепции комплексной переработки железорудного сырья и рационального использования ресурсного потенциала Яковлевского месторождения с получением товарной продукции широкой номенклатуры показала высокую экономическую эффективность.

Дальнейшие исследования планируется продолжать в направлении оптимизации производственных процессов в целом и улучшении технологических показателей производства, обеспечивающих высокую конкурентоспособность железорудных предприятий на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Е.А. Математическая модель зависимости газопроницаемости шихты от ее влажности в процессе производства агломерата // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2010. № 2. С. 37-40.
2. Анализ современного состояния добычи и переработки руд и железорудного сырья в Российской Федерации / Т.И.Юшина, И.М.Петров, Г.И.Авдеев, В.С.Валавин // Горный журнал. 2015. № 1. С. 41-47. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.08
3. Газодинамические особенности слоя исходной аглошихты / И.С.Берсенев, Б.А.Боковиков, В.И.Клейн и др. // Сталь. 2010. № 9. С. 16-18.
4. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 г.». М.: Всероссийский НИИ минерального сырья имени Н.М.Федоровского, 2019. 424 с.
5. Дашко Р.Э. Минеральные воды Яковлевского месторождения КМА: Диагностика и возможность использования // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. № 1. С. 33-38.
6. Дик Ю.А. Геомеханическое обоснование камерной системы разработки с «шахтным» расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства / Ю.А.Дик, А.В.Котенков, М.С.Танков // Горный журнал. 2014. № 9. С. 41-45.
7. Добыча железной руды в мире и в России // Портал для недропользователей dprom.online – 2020. URL: <https://dprom.online/metallurgy/dobycha-zheleznoj-rudy-v-mire-i-v-rossii/> (дата обращения 10.03.2021).
8. Добыча железной руды в мире // Промышленный портал PROMZN.RU – 2017. URL: <https://promzn.ru/metallurgiya/dobycha-zheleznoj-rudy-v-mire.html> (дата обращения 11.03.2021).
9. Добыча железной руды в России, крупнейшие месторождения и способы добычи // 2CAD Информационная поддержка горной отрасли – 2021. URL: <https://2cad.ru/blog/gornoe-delo/dobycha-zheleznoj-rudy-v-rossii-krupnejshie-mestorozhdeniya-i-sposoby-dobychi/> (дата обращения 12.03.2021).
10. Железные руды России. 2017 год // Бизнес портал NEDRADV – 2017. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources?obj=ab05b068239ede80d3dd35cf40488eca> (дата обращения 12.03.2021).
11. Зубов В.П. Повышение концентрации горных работ при разработке мощных крутопадающих рудных тел слабонаклонными слоями с закладкой выработанного пространства / В.П.Зубов, А.С.Малютин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S7. С. 491-497.
12. Как работает рынок железной руды: предложение и доля на рынке (VALE, RIO) – 2021 Talkin go money // Talking of money.com. Financial Magazine – 2021. URL: <https://ru.talkingofmoney.com/how-iron-ore-market-works-supply-market-share> (дата обращения 12.03.2021).
13. К вопросу о перспективе развития агломерационного производства / В.Л.Трушко, В.А.Утков, Д.Ф.Нурғалиев и др. // Черная металлургия. 2015. № 7 (1387). С. 45-50.
14. Коротков А.И. Проблема использования вод рудно-кристаллического водоносного горизонта в бальнеологических целях / А.И.Коротков, А.А.Тимченко // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 223-230.
15. Кусков В.Б. Подготовка железосодержащих материалов к металлургической переработке / В.Б.Кусков, Я.В.Кускова, А.В.Корнев // Обогащение руд. 2011. № 5. С. 38-40.
16. Кусков В.Б. Разработка технологии получения железооксидных пигментов / В.Б.Кусков, Я.В.Кускова // Металлург. 2010. № 3. С. 70-72.

17. Панычев А.А. Математическая модель процесса агломерации для его оптимизации и автоматизации // Обогащение руд. 2006. № 2. С. 29-31.
18. Патент № 2012112768/03 РФ. Способ разработки крутопадающих рудных тел с неустойчивыми рудами / Ю.А.Дик, А.В.Котенков, М.С.Танков, В.В.Минин, А.С.Кульминский, О.Ю.Арестов. Опубл. 02.04.2012. Бюл. № 13.
19. Потемкин Д.А. Моделирование процессов сдвижения массива горных пород при нисходящем порядке отработки рудного тела Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 137-141.
20. Потемкин Д.А. Параметры поля напряжений в рудно-кристаллическом массиве до начала ведения горных работ / Д.А.Потемкин, В.Ф.Плещинский // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 123-126.
21. Протосеня А.Г. Моделирование геомеханических процессов в рудном массиве с использованием модели физически нелинейного тела // Записки Горного института. 2015. Т. 214. С. 13-21.
22. Протосеня А.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива в зоне влияния очистных работ / А.Г.Протосеня, К.Г.Синякин // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 240-243.
23. Семенов В.И. Оценка устойчивости обнажений выработок в физически нелинейно деформируемом рудном и закладочном массиве Яковлевского месторождения / В.И. Семенов, Ю.И. Рубчевский // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18216> (дата обращения 12.03.2021).
24. Созонов К.В. Оценка напряженно-деформированного состояния очистных камер при разработке Яковлевского месторождения // Известия Тульского государственного университета. 2016. № 4. С. 229-234.
25. Созонов К.В. Технологии перехода от слоевой камерным системам разработки с закладкой выработанного пространства // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 5 (53). С. 29-36.
26. Трушко В.Л. Геомеханические и гидрогеологические проблемы освоения Яковлевского месторождения / В.Л.Трушко, А.Г.Протосеня, Р.Э.Дашко // Записки Горного института. 2010. Т. 185. С. 9-18.
27. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. Iss. 4. P. 249-261. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.008
28. Litvinenko V.S. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // International European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2018), 22-26 May, 2018, Saint Petersburg, Russian Federation. OnePetro, 2018. P. 3-16.
29. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technical Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. P. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4
30. Protosenya A.G. Introduction of the method of fine-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, V.I.Ockurov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6. № 7 (90). P. 11-18. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.116692
31. Trushko V.L. Stress-Strain Behavior of the Workings during the Rich Iron Ores Development under the Confined Aquifers / V.L.Trushko, A.G.Protosenya, O.V.Trushko // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 1. № 23. P. 11153-11164.

Авторы: В.Л.Трушко, д-р техн. наук, проректор по специальным проектам, Trushko_VL@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9742-1076> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), О.В.Трушко, канд. техн. наук, начальник патентно-лицензионного отдела, trushko_ov@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3936-1634> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.03.2021.

Статья принята к публикации 28.07.2021.