

УДК 622.831:622.274

**Харисов Тимур Фаритович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории геомеханики  
подземных сооружений  
Института горного дела УрО РАН  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: timur-ne@mail.ru

**Харисова Ольга Дмитриевна**

младший научный сотрудник  
лаборатории сдвижения горных пород  
Института горного дела УрО РАН  
e-mail: [OlgaZheltysheva@gmail.com](mailto:OlgaZheltysheva@gmail.com)

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
МАССИВА В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ В СЛОЖНЫХ  
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ***Аннотация:*

*Определение оптимальных параметров устойчивых камер и целиков для предотвращения обрушения горных пород и проникновения песчано-глинистых масс в подземные выработки на Соколовском подземном руднике является актуальной проблемой. Для ее решения использовалось многовариантное численное моделирование методом конечных элементов с помощью программного комплекса Rocscience RS2, который учитывает не только физико-механические свойства пород и действующие в массиве напряжения, но и структурные характеристики массива, а также степень техногенного воздействия. В результате определено изменение напряженно-деформированного состояния массива, на основании чего вычислены коэффициент устойчивости окружающего массива, величины и направления его смещений, а также установлены зоны распределения вероятности разрушения массива в заданных интервалах граничных условий. Определены параметры камер и целиков, обеспечивающие общую устойчивость, минимизирующие возможность прорыва водогазевых масс в выработки.*

*Ключевые слова:* подземная разработка, параметры камер и целиков, устойчивость выработок, обрушение горных пород, напряженно-деформированное состояние, модель Хоэка – Брауна, метод конечных элементов, численное моделирование, Rocscience RS2, конвергенция выработок

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.079

**Kharisov Timur F.**

Candidate of Engineering Sciences,  
Senior Researcher  
of the Laboratory of Geomechanics  
of Underground Structures,  
Institute of Mining, UB RAS,  
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: timur-ne@mail.ru

**Kharisova Olga D.**

Junior Researcher  
of the Rock Movement Laboratory,  
Institute of Mining, UB RAS  
e-mail: [OlgaZheltysheva@gmail.com](mailto:OlgaZheltysheva@gmail.com)

**STUDY OF ROCK MASS STABILITY  
IN PROCESS OF MINING UNDER  
COMPLEX MINING  
AND GEOLOGICAL CONDITIONS***Abstract:*

*The determination of the optimal parameters of stable stopes and pillars to prevent the rock collapse and penetration of sand-clay masses into underground workings at Sokolovsky underground mine is an urgent problem. The way for resolving this problem has used the multivariate numerical simulation by finite element method using Rocscience RS2 software complex, which takes into account not only physical and mechanical properties of rocks and actual rock mass stresses, but also structural characteristics of the rock mass, as well as the degree of technogenic impact. As a result, the change in the stress-deformed state of the rock mass has been determined, on the basis of which the stability coefficient of the surrounding rock mass, the magnitude and direction of its displacements have been calculated, as well as zones for distributing the probability of rock mass fragmentation in specified intervals of boundary conditions have been determined. The paper determines the parameters of stopes and pillars providing the general stability and minimizing the possibility of breakthrough of water mud masses into the workings.*

*Key words:* underground mining, parameters of stopes and pillars, stability of workings, rock collapse, stress-deformed state, Hoek-Brown model, finite element method, numerical modeling, Rocscience RS2, convergence of workings

**Введение**

Разработка Соколовского месторождения подземным способом осложняется неблагоприятными горно-геологическими условиями в массиве горных пород. Главным негативным природным фактором, затрудняющим эффективное и безопасное ведение

горных работ, является наличие толщи обводненных рыхлых мезокайнозойских отложений, перекрывающей скальную рудоносную зону месторождения и создающей опасность прорыва водогрязевых масс в горные выработки.

На первом этапе работы рудника применялась этажно-камерная система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, однако и в этих условиях имели место обрушения вмещающих пород, в некоторых случаях – с выходом на дневную поверхность. Сразу же после образования воронок обрушения в них начинался приток подземных вод из олигоценового горизонта, и они заполнялись водой до статического уровня на данном горизонте. Все образовавшиеся на поверхности воронки засыпались скальной породой для предотвращения оплывания их стенок и снижения объема свободной воды.

После 1998 г. на руднике произошел переход на систему разработки с обрушением руды и вмещающих пород. В результате проведения добычных работ на шахтном поле образовалось более 30 воронок обрушения, при этом их засыпка не производилась. Суммарный объем поверхностных вод, накопившихся во всех открытых воронках, к 2005 г. составил несколько сотен тысяч м<sup>3</sup>. Тем не менее до 2005 г. аварийных прорывов воды не происходило, но периодически наблюдались выходы в горные выработки глинисто-песчаных или песчано-глинистых масс с обломками скальных пород.

При дальнейшем развитии горных работ начали появляться вторичные воронки обрушения, образовывавшиеся в старых воронках, заполненных поверхностными водами. Три таких повторных выхода сопровождалось кратковременными прорывами поверхностных вод в подземные горные выработки, причем последний – наиболее крупный – имел катастрофические последствия.

Для предотвращения в будущем прорывов поверхностных вод была произведена засыпка всех открытых воронок скальными породами, а на территории зоны обрушения образован отвал из пород, извлеченных из Соколовского карьера [1]. После внедрения этих мер прорывов воды больше не происходило. Однако в настоящее время практически во всех отработанных и отрабатываемых панелях отмечены случаи выхода песчано-глинистых масс (ПГМ) на горизонты выпуска – в дучки и доставочные выработки. Их выход влечет за собой не только засорение руды, но и при больших объемах вышедших ПГМ может приводить к закупориванию дучек и проникновению масс в подготовительно-нарезные выработки, вплоть до полной остановки работ.

В результате в недоступных более блоках остаются огромные потери руды, а также возрастает объем дополнительных подготовительно-нарезных работ, необходимых для доступа к оставшимся частям рудного блока.

Для снижения рисков проникновения ПГМ в выработки было предложено перейти от одностадийной технологии отработки очистных рудных блоков – системы этажного принудительного обрушения со сплошной выемкой руды под обрушенными породами, используемой в настоящее время на руднике, на двухстадийную технологию – систему разработки этажным принудительным обрушением с вертикальными компенсационными камерами. При данной системе первоначально часть запасов блока вынимают в виде камер, а затем на образовавшееся компенсационное пространство обрушают оставшуюся часть блока путем разрушения межкамерных и межблочных целиков. Затем осуществляют донный выпуск взорванной руды под налегающими обрушенными породами.

Главным преимуществом данной системы разработки является возможность выемки большего процента чистой руды из камер, чем под обрушенными породами. Недостатком данной системы является наличие риска возникновения внезапного и неконтролируемого самообрушения компенсационных камер, что чревато нарушениями остального массива и опасностью воздушных ударов. Однако высокая трещиноватость и сравнительно низкая устойчивость рудного массива Соколовского рудника уменьшает веро-

ятность возникновения воздушных ударов, поскольку возможные самообрушения в камерах с большой вероятностью будут развиваться постепенно: с вывалами более мелких породных блоков, чем в низкотрещиноватых массивах. При этом участок возникновения самообрушения в камере можно использовать в качестве индикатора местоположения возможного прорыва ПГМ.

#### *Объект и методы исследований*

Северный участок Соколовского месторождения сложен двумя комплексами горных пород: палеозойским, представленным сложно дислоцированными эффузивно-осадочными породами нижнего карбона, и вышележащим мезокайнозойским. Верхний комплекс пород сложен горизонтально залегающими осадочными породами, представленными песчано-глинистыми отложениями мезокайнозойского возраста, средней мощностью 115 м. Наличие данной водоносной песчано-глинистой толщи, перекрывающей скальную рудоносную зону месторождения, и является главным негативным природным фактором, затрудняющим эффективное и безопасное ведение горных работ.

Категория устойчивости руд IV-V, коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова –  $f = 5 \div 8$ . С глубины 300 м (от земной поверхности) месторождение отнесено к категории склонных к горным ударам. В настоящее время горные работы на исследуемом участке достигли горизонта -260 м, что при абсолютных отметках поверхности около 190 м соответствует глубине 450 м.

Для установления оптимальных параметров камер, при которых их кровля будет сохранять общую устойчивость, а также межкамерных и межблочных целиков по простиранию и вкрест простирания, было выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов в двумерной постановке. Использование метода численного моделирования позволяет учитывать большое количество факторов, влияющих на состояние массива [2 – 7]. Данный метод находит все более широкое применение для расчета устойчивости подземных выработок, способствуя решению целого ряда задач: снижения потерь и разубоживания руды [8 – 10], обеспечения безопасности горных работ в удароопасных условиях [3, 11], совершенствования систем разработки [12 – 18] и др.

Моделирование выполнялось в программном комплексе Rocscience RS2 (ранее – Phase2) [19]. Программа RS2 представляет собой мощный инструмент для моделирования методом конечных элементов, позволяя быстро создавать сложные многостадийные модели, а также предоставляет широкие возможности для всестороннего анализа полученных результатов [12, 20].

Созданная модель представляет собой упруго-пластичный массив, в котором поочередно были образованы две выработки (камеры), разделенные между собой целиком. Выбор количества камер обоснован размерами очистного блока на участке работ.

Граничные условия для модели установлены по данным ранее выполненным лабораторных испытаний образцов:

$\gamma = 0,026 \text{ МН/м}^3$  – удельный вес горного массива (налегающей породной толщи);

$\lambda = \mu / (1 - \mu) = 0,3 / (1 - 0,3) = 0,4$  – коэффициент бокового давления горного массива;

$\mu = 0,3$  – коэффициент Пуассона.

В модели заданы действующие в массиве горизонтальные ( $\sigma_{\text{шир}}$ ,  $\sigma_{\text{мер}}$ ) и вертикальные напряжения ( $\sigma_{\text{верт}}$ ), определенные ранее натурными измерениями на данном участке месторождения [21, 22]:

$$\sigma_{\text{верт}} = 13 \text{ МПа}, \sigma_{\text{шир}} = 16 \text{ МПа}, \sigma_{\text{мер}} = 16 \div 20 \text{ МПа}.$$

Моделирование производилось для глубины  $H = 500$  м.

В качестве прочностных характеристик пород массива были приняты физико-механические свойства магнетитовой руды:

- предел прочности образца пород на сжатие  $\sigma_{\text{сж}} = 45 \text{ МПа}$ ;
- модуль Юнга  $E = 5300 \text{ МПа}$ .

В программе Rocscience RS2 использовалась модель поведения массива Хоека – Брауна (Хоек – Brown) [23, 24], одним из главных достоинств которой, в отличие от наиболее распространенной на практике модели Мора – Кулона, является ее нелинейность. Эмпирические параметры, предложенные Э. Хоеком и Э.Т. Брауном, учитывающие разнообразные структурные особенности и свойства скальных грунтов, были получены ими при анализе множества лабораторных и полевых испытаний [25].

Одной из самых важных характеристик грунта при использовании модели Хоека – Брауна является геологический индекс прочности GSI – безразмерная величина, характеризующая трещиноватость и раздробленность горных пород [25]. Данный параметр определяется на основании визуальной оценки структуры массива и поверхности трещин.

Помимо возможности учета структурных характеристик массива горных пород, модель также принимает во внимание степень техногенного влияния на массив, зависящую от способов ведения горных работ. Коэффициент нарушения  $D$  характеризует вызываемое техногенным воздействием дополнительное нарушение сплошности массива [25].

Параметр ненарушенной породы  $m_i$  устанавливается на основе геологического описания горной породы в соответствии с ее литологическим типом. Этот параметр также был получен Э. Хоеком и Э.Т. Брауном эмпирическим путем; он никак не описывает степень трещиноватости или физико-механические свойства грунта, а лишь соответствует его литологии и генезису [25].

Вышеперечисленные эмпирические параметры, используемые в модели Хоека – Брауна, определяются по соответствующим таблицам и диаграммам, представленным в работах авторов данной модели [23, 24], а также заложенным в программное обеспечение [19].

Так как массив характеризуется неоднородностью прочностных свойств и напряженно-деформированного состояния, то в программном комплексе предусмотрен вероятностный анализ, учитывающий изменение в установленных интервалах заданных граничных условий для создаваемой модели массива (табл. 1).

Таблица 1

**Интервалы изменения граничных условий**

№	Свойства массива	Среднее значение, МПа	Стандартное отклонение, МПа
1	Прочность на одноосное сжатие образца горной породы в ненарушенном состоянии $\sigma_{ci}$	45 МПа	15 МПа
2	Геологический индекс прочности GSI	55	10
3	Параметр ненарушенной породы $m_i$	20	5
4	Коэффициент нарушения $D$	0.8	0.1
5	Вертикальные напряжения $\sigma_{верт}$	13	2
6	Горизонтальные широтные напряжения $\sigma_{шир}$	16	2
7	Горизонтальные меридиональные напряжения $\sigma_{мер}$	18	2

Исследования включали две стадии: на первом этапе анализировалось изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива после образования одиночной камеры, на втором этапе – после формирования двух камер. Кроме того, моделирование выполнялось при различных геометрических параметрах выработок – камер и целиков [26].

### Результаты и обсуждение

В результате численного моделирования определяется изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива, вызванное образованием выработанного пространства, на основании чего оцениваются условия его устойчивости, а именно – коэффициент устойчивости (Strength Factor) и распределение трещин (Yielded Elements) [27].

Значение коэффициента Strength Factor, равное или превышающее 1,0, соответствует устойчивому состоянию выработки, меньшие значения – высокой вероятности обрушения массива. На основании оценки данного параметра были установлены оптимальные размеры выработок, обеспечивающие их устойчивость в процессе разработки (табл. 2). Кроме того, придание кровле камер арочной формы позволяет снизить величину действующих на ее контуре напряжений [26, 28].

Таблица 2

**Оптимальные параметры камер и целиков**

Параметры	Вкрест простирания	По простиранию
Высота камеры, м	Не более 35	
Ширина камеры, м	Не более 17	Не более 22
Межкамерный целик, м	Не менее 30	-
Межблочный целик, м	-	Не менее 30
Форма кровли	Арочная	

Результаты моделирования с заданными оптимальными параметрами камер и целиков представлены на рис. 1 – 3. Результаты компьютерного моделирования, полученные для продольных и поперечных разрезов выработок, практически аналогичны.

На рис. 1 показано определенное по результатам моделирования распределение коэффициента устойчивости массива вокруг выработанного пространства вкрест простирания, а также картина распределения возможных трещин сдвига и растяжения (Shear and Tension joints).

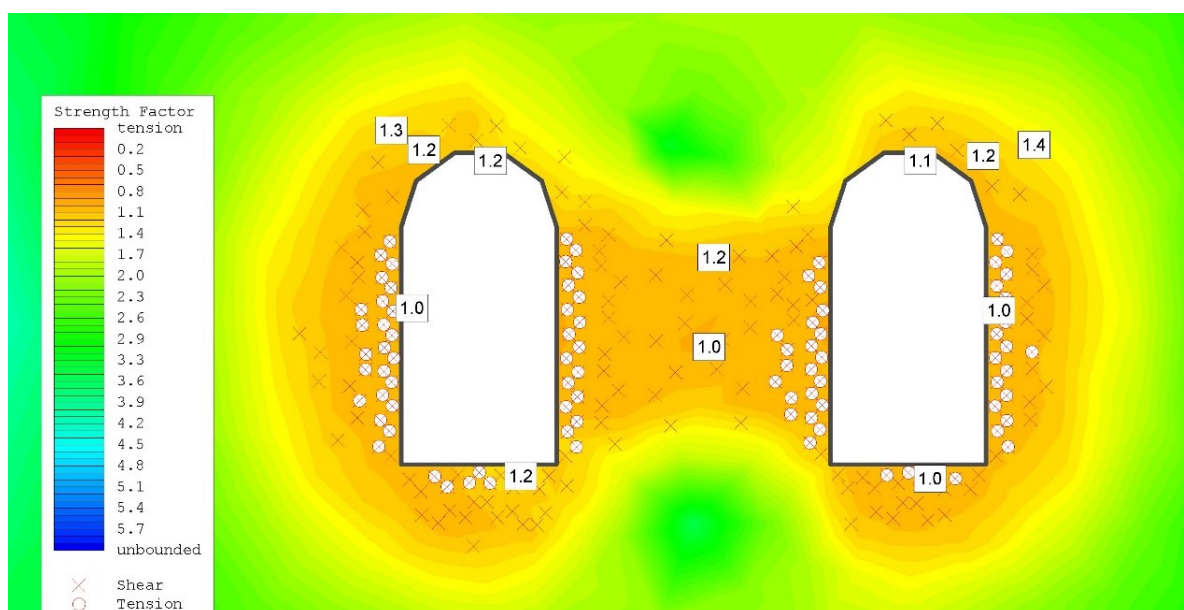


Рис. 1 – Распределение коэффициента устойчивости массива (разрез вкрест простирания)



Значение коэффициента устойчивости вблизи выработанного пространства составляет не менее 1,0, что соответствует устойчивому состоянию массива. Картина распределения потенциальных трещин свидетельствует о возможности локального нарушения стенок камер, но при этом устойчивость кровли сохраняется.

Прогнозируемые смещения породных стенок направлены к центрам камер – явление, известное как *конвергенция* [29 – 31]. Их величины на разрезе вкрест простирания по расчетным данным могут достигать значения 11 см во внешних стенках выработки и около 6 см в ее кровле.

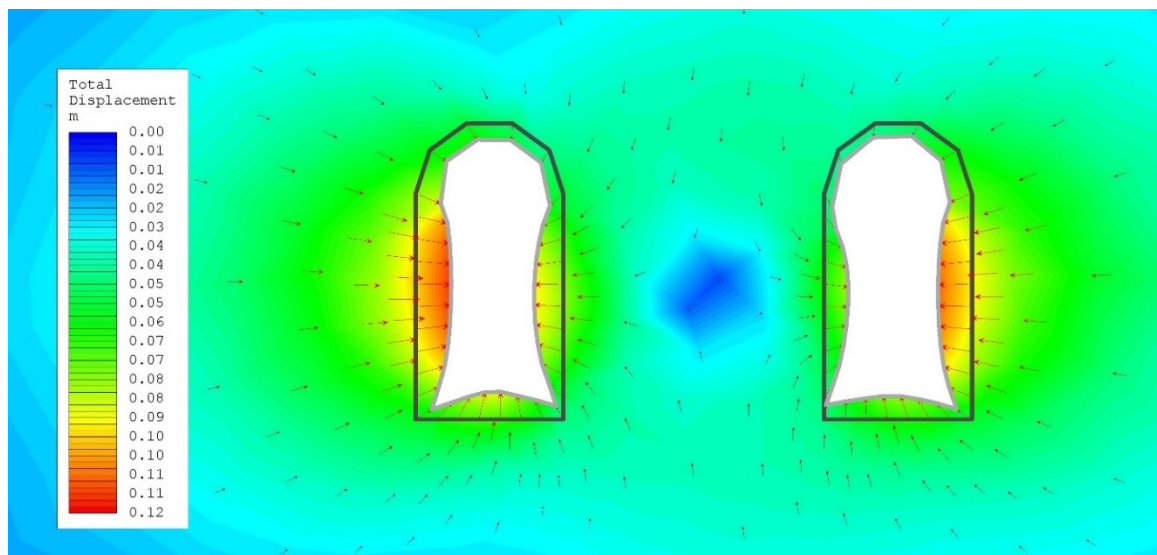


Рис. 2 – Смещения породных стенок выработок и окружающего массива (разрез вкрест простирания)

На рис. 3 представлены результаты вероятностного анализа обрушения окружающего массива с учетом изменения граничных условий (см. табл. 1). Темные области свидетельствуют о том, что обрушение окружающего массива произойдет при любом значении граничных условий из заданного интервала. Более светлые области свидетельствуют о наименее вероятной возможности обрушения массива.

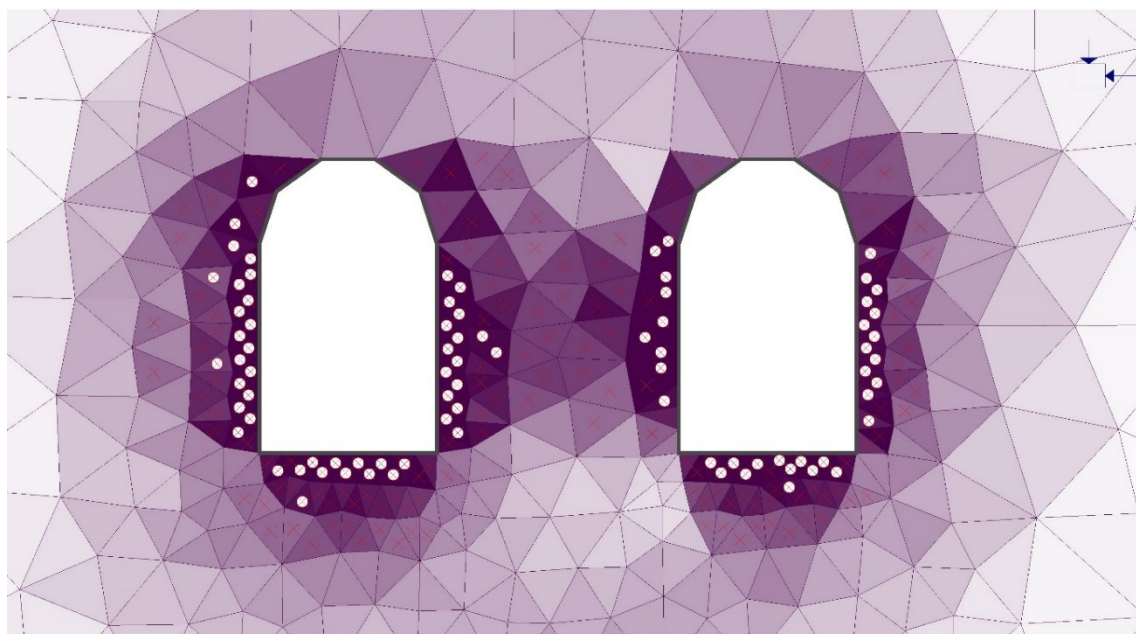


Рис. 3 – Зоны распределения вероятности разрушения массива в заданных интервалах граничных условий (разрез по простиранию)

Установлено, что зоны наибольшей вероятности обрушения массива сконцентрированы в стенках и почве камер, возможность обрушения кровли камер маловероятна. Глубина нарушенной зоны по данным моделирования составляет около 6 м. Вероятность устойчивости целика оценивается как удовлетворительная для заданного диапазона значений граничных условий.

### Выводы

Рекомендованная для применения на шахте «Соколовская» двухстадийная технология отработки очистных рудных блоков снижает риск проникновения ПГМ в выработки, обеспечивая более безопасное и эффективное ведение горных работ, чем принятая в настоящее время на руднике система этажного принудительного обрушения со сплошной выемкой руды, а также повышает полноту и качество выемки руды. Однако полностью ее преимущества реализуются при условии сохранения устойчивости кровли компенсационных камер.

Выполненное методом конечных элементов многовариантное численное моделирование влияния очистных выработок на массив позволило определить оптимальные геометрические параметры камер и целиков, обеспечивающие устойчивость окружающего массива в процессе разработки. Рекомендуемая арочная форма кровли камер обеспечивает устойчивость потолочины, минимизируя вероятность ее самообрушения и выхода ПГМ в выработанное пространство.

Применение программного комплекса Rocscience RS2 позволило учесть большое количество факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние массива, а также проанализировать изменение граничных условий модели и оценить вероятность обрушения. Реализованный в программном комплексе критерий прочности Хоека – Брауна учитывает нелинейное деформирование скальных грунтов, а также структурные особенности массива и степень техногенного воздействия на него.

С целью проверки результатов теоретических исследований на руднике планируется создание опытно-промышленного участка, в проекте которого будут определены необходимые параметры (потери, засорение и т. д.). Результаты натурных исследований позволят сделать окончательный вывод об эффективности предложенной технологии.

### Литература

1. Урдубаев Р. А. Подземные горные работы в АО «ССГПО» / Р. А. Урдубаев, С. В. Верин, Р. В. Шихаметов // Горный журнал. – 2014. – № 6. – С. 32 – 37.
2. Тюпин В. Н. Установление динамически устойчивых размеров обнажений трещиноватого напряженного горного массива при камерных вариантах систем разработки / В. Н. Тюпин // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2016. – Т. 22. – № 6. – С. 31 – 39.
3. Куранов А. Д. Метод определения безопасных параметров междукамерных целиков на рудниках ЗАО «Эльконский ГМК» / А. Д. Куранов, Д. В. Сидоров, А. В. Сучилин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2013. – № 1. – С. 115 – 119.
4. Niculae R.R. The surface's stability analysis with finite element method under the coal mining at e.m. Livezeni / R. R. Niculae // Journal of Young Scientist. – 2013. – Vol. I. – P. 69 – 74.
5. Radouane N. Stability Analysis of Underground Mining and their Application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria / N. Radouane, M. Boukelloul, M. Fredj // Procedia Earth and Planetary Science. – 2015. – Vol. 15. – P. 237–243. - DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.058
6. Shabanimashcool M. A numerica / M. Shabanimashcool, C. C. Li // Int. J. Coal Geol. – 2013. – Vol. 106. – P. 39–47. - DOI: 10.1016/j.coal.2012.12.008

7. Numerical investigation of coal pillar failure under simultaneous static and dynamic loading / S. Wang, S. Hao, Y. Chen, J. Bai, X. Wang, Y. Xu // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2016. – Vol. 84. – P. 59–68. - DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.01.017
8. Авдеев А. Н. Обоснование параметров устойчивых междукамерных целиков и обнажений кровли камер на Тыретском руднике / А. Н. Авдеев, А. А. Давиденко, Л. И. Сосновский // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* – 2014. – № 12. – С. 66 – 71.
9. Подопригора В. Е. Обоснование рациональных параметров поэтажно-камерной системы разработки с применением метода конечных элементов / В.Е. Подопригора // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2005. – № 5. – С. 216 – 219.
10. Литвиненко В.С. Физическое и математическое моделирование технологических параметров этажно-камерной системы разработки нижнего горизонта рудника им. Губкина / В. С. Литвиненко, Э. И. Богуславский, П. В. Коржавых // *Записки горного института.* – 2012. – Т. 195. – С. 115 – 119.
11. Черепов А. А. Исследование распределения напряжений и деформаций геомассива при камерно-столбовой системе разработки мощного пологого угольного пласта / А. А. Черепов, С. Н. Ширяев, В. Ю. Кулак // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2017. – № 9. – С. 170–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-170-178
12. Оценка устойчивости камер в условиях месторождения «Мир» / А. Н. Петров, В. И. Слепцов, Д. Д. Акимов // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2014. – № 9. – С. 389–393.
13. Nomikos P. P. An analytical probability distribution for the factor of safety in underground rock mechanics / P. P. Nomikos, A. I. Sofianos // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2011. – Vol. 48. – Iss. 4. – P. 597–605. - DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.02.015
14. Yang H. Performance of pillar design in underground stone mines that include discontinuities / H. Yang, W. Kim, M. Ali // *Geosystem Engineering.* – 2012. – Vol. 15. – Iss. 3. – P. 187–194. - DOI: 10.1080/12269328.2012.704160
15. A strain-based failure criterion for pillar stability analysis / O. Gaede, C. Schrank, I. Canbulat, A. Karrech // *AusRock 2014: Proceedings of Third Australasian Ground Control in Mining Conference.* – Sydney: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. – P. 393–398.
16. Huang Z. Buckling failures of reserved thin pillars under the combined action of in-plane and lateral hydrostatic compressive forces / Z. Huang, X. Dai, L. Dong // *Comput. Geotech.* – 2017. – Vol. 87. – P. 128–138. - DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.02.013
17. Zhang W Research on reasonable size of large coal pillar between panels at mining face with soft surrounding rock / W. Zhang, X. Kong, T. Kang, G. Zhao // *Min. Res. Dev.* – 2013. – Vol. 33. – P. 14–17.
18. Determining the reasonable width of narrow pillar of entry in gob entry driving in the large pillar / K. Zhang, Y. Jiang, Z. Zhang, Y. Zhang, X. Pang, X. Zeng // *J. Min. Saf. Eng.* – 2014. – Vol. 31. – P. 255–262.
19. Rocscience RS2. URL: <https://www.rocscience.com/software/rs2> (дата обращения 07.08.2018).
20. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного пространства в программе «Phase 2» / П. С. Шпаков, В. Н. Долгонос, А. А. Нагибин, Е. В. Кайгородова // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2015. – № 9. – С. 59–66.
21. Панжин А. А. Природное и техногенно измененное напряженно-деформированное состояние породного массива на ССГПО / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // *Маркшейдерия и недропользование.* – 2014. – № 5 (73). – С. 44–51.
22. Особенности напряженного состояния горного массива Соколовского железорудного месторождения / А. Е. Балек, А. А. Панжин, Ю. П. Коновалова, Д. Е. Мельник // *Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений:*



сб. докладов VII Международной научно-технической конференции (Екатеринбург, 11 апреля 2018). – Екатеринбург: УГГУ, 2018. – С. 256–264.

23. Hoek E. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses / E. Hoek, D. Wood, S. Shah // Eurock 1992: Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization. – London, 1992. – P. 209–213.

24. Hoek E. Corkum Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition / E. Hoek, C. Carranza-Torres // NARMS-TAC 2002: Proceedings of the Conference. – Toronto, 2002. – P. 267-273.

25. Сас И. Е. Об особенностях модели поведения скального грунта Хоека - Брауна и задании ее исходных параметров / И. Е. Сас, А. В. Бершов // Инженерные изыскания. – 2015. – № 13. – С. 42–47.

26. Wang Steady analysis of gob-side entry retaining formed by roof fracturing and control techniques by optimizing mine pressure / Y. Gao, Z. Guo, J. Yang, J. Wang, Y. // J. China Coal Soc. – 2017. – Vol. 42. – P. 1672–1681.

27. Sepehri M Stope stability assessment and effect of horizontal to vertical stress ratio on the yielding and relaxation zones around underground open stopes using empirical and finite element methods / M. Sepehri, D. Apel, W. Liu // Arch. Min. Sci. – 2017. – Vol. 62. – № 3. – P. 653–669. - DOI: 10.1515/amsc-2017-0047

28. Павлов С. П. К вопросу об оптимизации формы геологических выработок и топологии их укрепления / С. П. Павлов, В. А. Крысько, К. С. Бодягина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 6–12.

29. Харисов Т. Ф. Исследования конвергенции породных стенок ствола в условиях запредельного состояния призабойного массива / Т. Ф. Харисов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 5. – С. 46–51.

30. Харисов Т. Ф. Закономерности деформирования породных стенок ствола в процессе продвижения забоя в условиях запредельного напряженно-деформированного состояния массива / Т. Ф. Харисов, Д. Ю. Князев // Проблемы недропользования. – 2017. – № 1 (12). – С. 96–101. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.096

31. Харисов Т. Ф. Исследование деформации горных пород в процессе проходки вертикального ствола / Т. Ф. Харисов, В. А. Антонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №3. – С. 146-150.