

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВТОРИЧНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫБРОСООПАСНЫХ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ MAR3D

В.А. Еременко¹, З.В. Аксенов¹, Э.К. Пуль², Н.Е. Захаров²

¹ ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: prof.eremenko@gmail.com

² Мирнинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

Аннотация: Представлены результаты научно-исследовательской работы, посвященной изучению и управлению вторичным напряженным состоянием призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов на руднике «Интернациональный», а также моделированию напряженно-деформированного состояния, количественной и качественной оценке состояния массива. Показаны результаты оценки безопасности принятых параметров проведения и поддержания подготовительных выработок, расчеты избыточных напряжений в массиве и коэффициента запаса прочности, деформации выработки в бежевом (выбросоопасном) и сером доломитах на разных глубинах. Расчеты проводились по шести сценариям пересечения выработкой пластов выбросоопасного бежевого доломита. Моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива подготовительных выработок в выбросоопасных пластах проводилось в программном комплексе Mar3D. Полученные результаты количественного анализа используются в настоящее время для калибровки модели в течение всего периода проходки и поддержания выработок спирального съезда и автоуклона. На основе моделирования получены результаты определения структуры вторичных полей напряжений и деформаций в условиях проходки подготовительных выработок на выбросоопасных участках.

Ключевые слова: рудник «Интернациональный», газодинамические явления ГДЯ, внезапные выбросы, напряжения, деформации, индекс Q , программный комплекс Mar3D, программа RocData, критерии прочности Хука-Брауна и Кулона-Мора, взрывные работы ВР, подготовительная выработка.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00034).

Для цитирования: Еременко В.А., Аксенов З.В., Пуль Э.К., Захаров Н.Е. Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Mar3D // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 91–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104.

MAP 3D analysis of secondary stress field structure in face area of development headings in rockburst-hazardous seams

V.A. Eremenko¹, Z.V. Aksenov¹, E.K. Pul², N.E. Zakharov²

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: prof.eremenko@gmail.com

² Mirny Mining and Processing Plant, ALROSA, Mirny, Russia

Abstract: The article describes the research aimed to study and control the secondary stress field in face areas of development headings in rockburst-hazardous seams in the Internatsionalny Mine, as well as to model the stress-strain behavior and to obtain the qualitative estimate of rock mass condition. The authors present the resultant estimates of safety of the accepted drivage and roof support designs for development headings, excessive stresses and safety factor of rocks mass, as well as deformation of headings in beige rockburst-hazardous and grey dolomite rocks at different depths. The calculations were performed for six scenarios of intersection of beige rockburst-hazardous dolomite seams by a heading. The stress-strain behavior of surrounding rock mass around development headings in rockburst-hazardous seams was modeled in Map3D. The quantitative analysis results are currently used for the model calibration for the whole period of drivage and reinforcement of underground openings of spiral decline and motor transport ramp. Based on the modeling, the structure of secondary fields of stresses and strains during development heading in rockburst-hazardous rock mass has been determined.

Key words: Internatsionalny Mine, gas-dynamic phenomena, outbursts, stresses, strains, Q-index, Map3D, RocData, Hoek-Brown and Mohr-Coulomb strength criteria, drilling-and-blasting, development heading.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00034.

For citation: Eremenko V.A., Aksenov Z.V., Pul E.K., Zakharov N.E. MAP 3D analysis of secondary stress field structure in face area of development headings in rockburst-hazardous seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(5):91-104. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104.

Введение

Рудник «Интернациональный» является склонным к горным ударам с глубины 1245 м и опасным по газодинамическим явлениям с глубины 1210 м [1, 2]. При производстве подготовительных горных работ во вмещающих породах с глубины 1190 м происходят внезапные инициированные взрывными работами выбросы пород и газа.

Газодинамические явления, обладающие высокой мощностью, происходят внезапно с интенсивным выделением природных горючих газов, что нарушает технологический процесс горного

производства и угрожает безопасности работы персонала рудника. При этом, как правило, отсутствуют предупредительные признаки и предвестники выбросов. Проведена оценка безопасности принятых параметров проведения выработок на основе результатов численного моделирования и расчет влияния выработки на напряженно-деформированное состояние горного массива в условиях ведения горных работ на руднике «Интернациональный». Структура формируемых при проходке выработок вторичных полей напряжений [3 – 15] (исследование вторичных полей напря-

жений проводится по тематике гранта РФФИ, проект № 19-17-00034) зависит от сценариев выхода на забой бежевого выбросоопасного пласта доломита и серых невыбросоопасных пластов доломита (рис. 1).

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива выработок спирального съезда и автоуклона и их призабойной части с учетом горно-геологических условий

Согласно анализу и изучению горно-геологических и горнотехнических условий разработки трубки «Интернациональная» определены необходимые параметры начальной модели горнотехнической системы выработок различного направления, которые могут инициировать выбросы пород и газа.

Модель создавалась на основе принятой в проекте системы выработок в блоках 10–11. В модель входят подготовительные выработки в условиях проходки спирального съезда СС и автоуклона АУ. Оценка напряженно-деформированного состояния вмещающего массива призабойной части вырабо-

ток проводилась на основе численного моделирования и количественной характеристики горных пород на глубинах 1210–1730 м в условиях опасности возникновения выбросов пород и газа, вызванных действием максимальных напряжений и уникальными свойствами массива.

В качестве параметров построения модели были использованы: высота и ширина выработок, средние мощности выбросоопасного бежевого и серого невыбросоопасного доломита, угол наклона пластов, глубина ведения горных работ, а также действующие напряжения на глубинах 1200 и 1700 м. В расчетах рассматривался литостатический вариант исходного поля напряжений.

Современные исследования указывают на то, что в приповерхностной части земной коры в регионе исходное поле напряжений на месторождении по прогнозам относится к литостатическому типу. Ориентировочные направления действия главных напряжений в регионе месторождения принимаются исходя из рекомендаций по определению значений компонент природных напряжений для кимберлитовых месторождений с хорошо изученным геомеханическим состоя-



Рис. 1. Массив бежевого (ближе к почве) и серого доломита (ближе к кровле) в забое спирального съезда на глубине 1230 м

Fig. 1. Beige dolomite (at the floor) and grey dolomite (at the roof) in the face area of spiral decline at a depth of 1230 m

нием, а также из опыта ведения горных работ в схожих условиях данного типа месторождений, так как направление действия максимальных главных напряжений однозначно не определено.

Для расчетов и анализа использовался программный комплекс Mar3D, встроенный САПР для построения сложных трехмерных моделей, анализа и визуализации горного давления и упругих деформаций на контуре выработок (камер) и в целиках при различных критериях нарушенности массива горных пород и руд [16 – 18].

Для оценки напряженно-деформированного состояния массива в результате действия избыточного напряжения (т.е. напряжения, превышающего предельное) при упругом анализе использовался критерий прочности Хука-Брауна, который является функцией максимального и минимального значений главных напряжений, а также прочностных свойств массива горных пород. Этот критерий особенно хорошо подходит для оценки

устойчивости массива, которым представлены рассматриваемые условия. В качестве критерия нарушенности массива горных пород применяется коэффициент запаса прочности КЗП.

При обработке деформационно-прочностных свойств горных пород в массиве с помощью программы RocData, по критериям прочности Хука-Брауна и Кулона-Мора, определялся тип разрушения массива горных пород с помощью линии Можи для бежевого и серого доломита (рис. 2). В программе RocData линия Можи показала, что массив горных пород обладает упругими свойствами для конкретных рассматриваемых условий.

Прочность массива горных пород также определялась по обобщенному критерию Хука-Брауна с использованием программы RocData (табл. 1, рис. 2) [18 – 23]. Расчет был сделан для двух вариантов при геологическом индексе прочности 70 и 80, а в разломных зонах 45 и 40 — соответственно для бежево-

Таблица 1

Исходные параметры моделирования призабойной части выработок СС и АУ и свойств бежевого доломита

Initial parameters of modeling of face area of headings on spiral decline and motor transport ramp as well as beige dolomite properties

Параметры	В массиве	В разломной зоне
Предел прочности на сжатие (в образце), МПа	65	65
GSI (геологический индекс прочности)	70	35
Структурный индекс m_i	10	10
Модуль деформации (Юнга), в образце, ГПа	25	25
Сцепление, МПа	3,98	1,381
Угол внутреннего трения, °	33,346	15,144
Постоянная Хука-Брауна, mb	2,397	0,209
Постоянная Хука-Брауна, s	0,018	0,00005
Постоянная Хука-Брауна, a	0,501	0,516
Удельный вес пород, МН/м ³	0,025	0,025
Режим природных напряжений	литостатический	
Глубина горных работ от земной поверхности, м	1210 – 1730	

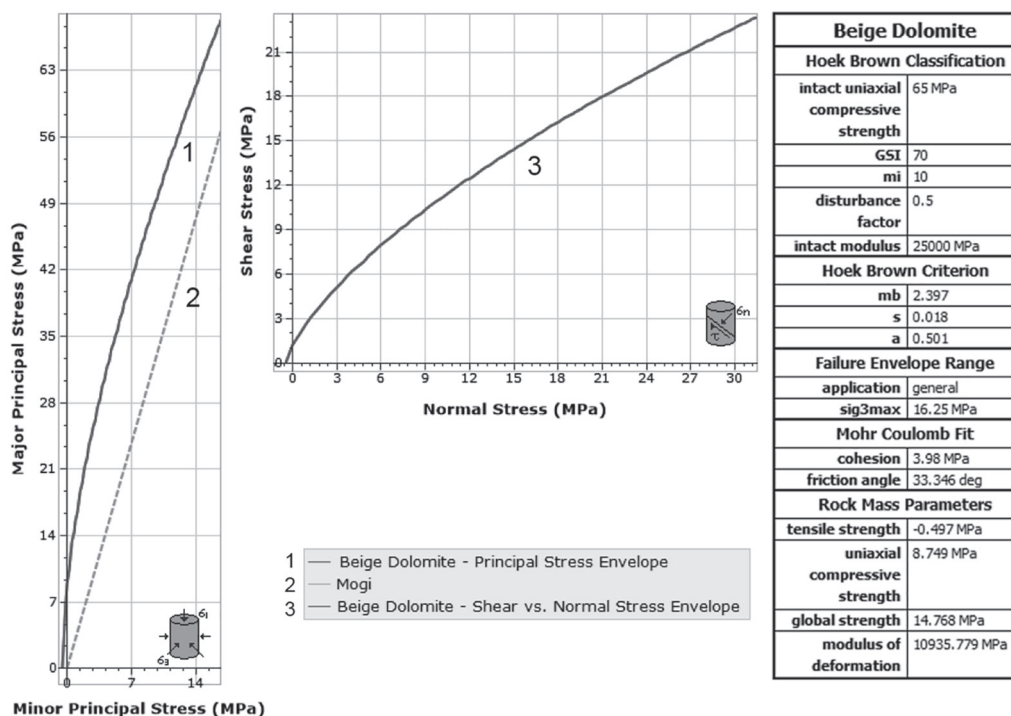


Рис. 2. Прочностные свойства бежевого выбросоопасного доломита в естественных условиях массива (расчеты выполнены в программе RocData)

Fig. 2. Strength properties of beige rockburst-hazardous dolomite in situ (calculated in RocData)

го и серого доломитов. Моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива призабойной части выработок в разломных зонах проводилось с уменьшением прочностных свойств массива, находящегося в естественных условиях.

Предел прочности доломитов находится выше линии Могги, до значений главных напряжений $\sigma_1 = 7,5$ МПа и $\sigma_3 = 2,5$ МПа для бежевых доломитов (рис. 2) и $\sigma_1 = 13$ МПа и $\sigma_3 = 4$ МПа для серых доломитов, из чего следует, что массив обладает упругими свойствами при значениях напряжений до $\sigma_1 > 7,5$ МПа и $\sigma_3 > 2,5$ МПа, а при $\sigma_1 > 13$ МПа и $\sigma_3 > 4$ МПа массив обладает пластическими свойствами.

При построении модели напряженно-деформированного состояния вмещающего массива призабойной части выра-

боток СС и АУ выставлялось 14 расчетных сеток:

СС

1. Сетка 1.1 (вертикальная) — вдоль выработки в забойной части СС;

2. Сетка 1.2 (вертикальная) — поперек выработки СС, на расстоянии 4 м от забоя;

3. Сетка 1.3 — горизонтальная сетка в середине верхней трети части выработки (рис. 3);

4. Сетка 1.4 — горизонтальная сетка в середине срединной трети части выработки (рис. 3);

5. Сетка 1.5 — горизонтальная сетка в середине нижней трети части выработки (рис. 3);

6. Сетка 1.6 — горизонтальная сетка в нижней части выработки;

7. Сетка 1.7 — вертикальная сетка, пересекает две спирали СС для опреде-

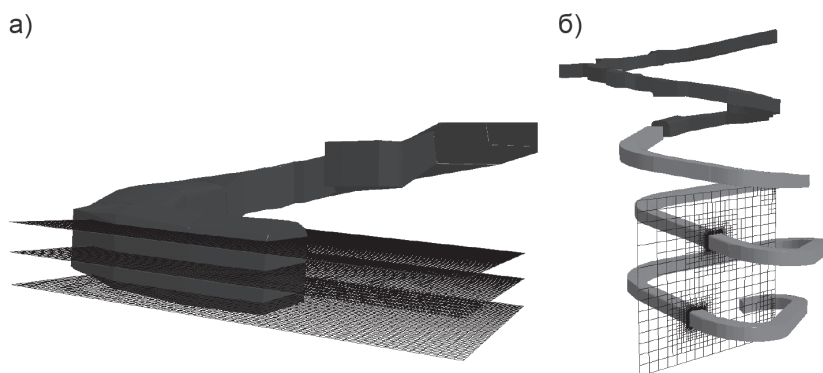


Рис. 3. Расчетные сетки 1.3–1.5 (а) и 1.7 (б) на СС
 Fig. 3. Computational grids (a) 1.3–1.5 and (b) 1.7 on spiral decline

ления области влияния выработок друг на друга в системе (рис. 3);

АУ

8. Сетка 2.1 (вертикальная) — вдоль выработки в забойной части АУ;

9. Сетка 2.2 (вертикальная) — поперек выработки АУ, на расстоянии 4 м от забоя;

10. Сетка 2.3 — горизонтальная сетка в середине верхней трети части выработки;

11. Сетка 2.4 — горизонтальная сетка в середине срединной трети части выработки;

12. Сетка 2.5 — горизонтальная сетка в середине нижней трети части выработки;

13. Сетка 2.6 — горизонтальная сетка в нижней части выработки;

14. Сетка 2.7 — вертикальная сетка, пересекает две спирали АУ для определения области влияния выработок друг на друга в системе.

Следует отметить, что анализ проводится в двух вариантах, отличающихся по глубине от земной поверхности: 1210 м и 1710 м для СС; 1230 м и 1730 м для АУ.

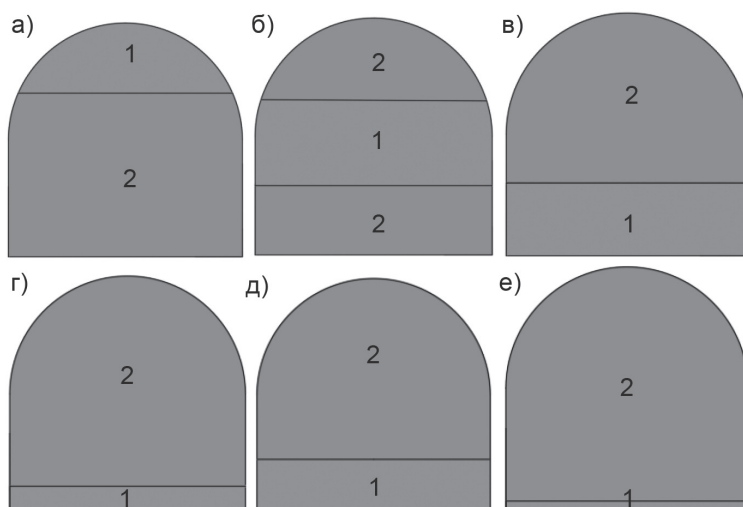


Рис. 4. Сценарии 1–6 выхода выбросоопасного доломита на забой выработки
 Fig. 4. Scenarios 1–6 of rockburst-hazardous dolomite exposure at the heading face

Таблица 2

**Откалиброванные значения критерия растягивающей деформации
растяжения для рудников глубиной свыше 1 км
Calibrated values of tensile strain criteria for mining depth below 1 km**

Состояние массива горных пород	Деформация растяжения ε_z	Раскрытие трещин	Рекомендации по установке крепи
Раздробленный (смятый)	$>500 \mu\varepsilon$	$>5 \text{ мм}$	Своды выработок следует укрепить тросовыми анкерами
Сильно нарушенный	$450\text{--}500 \mu\varepsilon$	до 5 мм	Если контур $500 \mu\varepsilon$ находится на расстоянии $0,5\text{--}1,5 \text{ м}$ от сечения выработки, необходимо установить анкера длиной $2,4 \text{ м}$ с торкретбетоном толщиной не менее 50 мм . При длине свыше $1,5 \text{ м}$ ($500 \mu\varepsilon$) необходимо дополнить основную крепь тросовыми анкерами
Нарушенный	$350\text{--}450 \mu\varepsilon$	до 2 мм	Условия типичные для большинства подготовительных выработок на глубине свыше $1,5 \text{ км}$. Крепь состоит из анкеров длиной $2,4 \text{ м}$ и сетки. Сетку заменяют армо-торкрет-бетоном в выработках с длительным сроком эксплуатации
Трещиноватый	$250\text{--}350 \mu\varepsilon$	$\sim 0\text{--}1 \text{ мм}$	Крепь состоит из анкеров длиной $2,4 \text{ м}$ и сетки
Зарождение трещины = предельная деформация растяжения	$\varepsilon_c = 150 \mu\varepsilon$	неразличимы	Крепь состоит из анкеров длиной $2,4 \text{ м}$ и сетки

Расчет проводился для шести сценариев пересечения выработками пластов доломита (рис. 4): бежевый доломит находится ближе к кровле выработки ($1/3$ от высоты), ниже серый доломит (а); по центру выработки ($1/3$), выше и ниже серый доломит (б); ближе к почве выработки ($1/3$ от высоты), выше серый доломит (в); ближе к почве выработки ($2/9$ от высоты), выше серый доломит (г); ближе к почве выработки ($1/9$ от высоты), выше серый доломит (д); ближе к почве выработки ($1/27$ от высоты), выше серый доломит (е).

Результаты моделирования выработок СС и АУ в бежевом и сером доломитах

После проведенных расчетов по всем сценариям и рассматриваемым глубинам

напряжение σ_1 не менялось на границе двух доломитов, что естественно — в упругом моделировании напряжение не зависит от свойств горных пород, а является исключительно функцией действующих тектонических сил и присутствия пустот (выработок) и их размеров.

Результаты моделирования по сценарию 1 (рис. 4, а) (бежевый доломит выходит в кровле выработки) показали, что величина избыточного напряжения $\Delta\sigma_1$ на глубине 1210 и 1230 м в сером доломите в пределах нормы, а в бежевом доломите наблюдается превышение в кровле выработки и в верхней части забоя (рис. 5, а). Превышение достигает 10 МПа .

Коэффициент запаса прочности КЗП на глубине 1210 и 1230 м в бежевом доломите меньше, чем в сером, а также

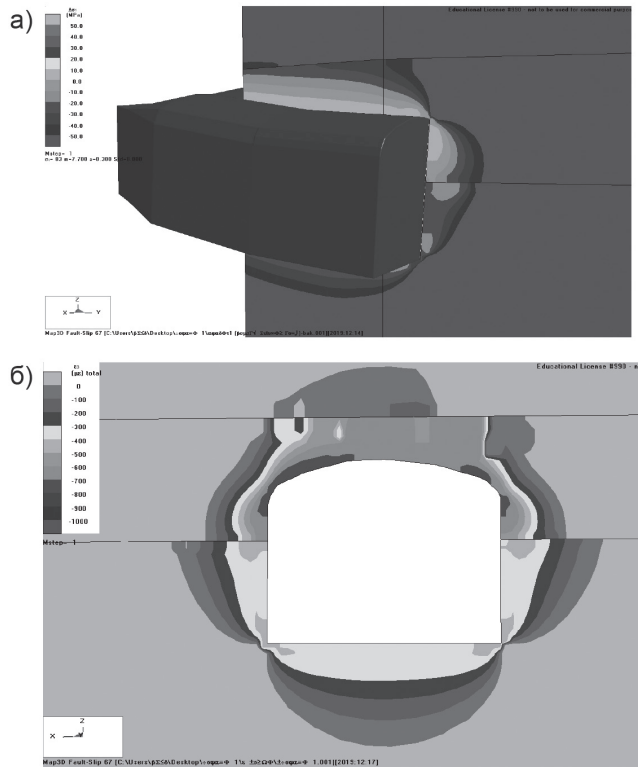


Рис. 5. Результаты моделирования СС на глубине 1210 м от земной поверхности: (а) избыточные напряжения $\Delta\sigma_1$ по сетке 1.1, по сценарию 1 и главные растягивающие деформации ε_3 , по сетке 1.2, по сценарию 1; (б) $-50\div 50$ МПа – избыточные напряжения; $0\div -1000$ – микродеформация

Fig. 5. Modeling results for spiral decline at a depth of 1210 m from ground surface: a– excessive stresses $\Delta\sigma_1$ by grid 1.1 in scenario 1 and principal tensile strains ε_3 by grid 1.2 by scenario 1; b– $-50\div 50$ MPa – excessive stresses; $0\div -1000$ – microstrain

меньше в кровле и в боках выработки, в верхней части забоя, от его груди в массив, поэтому горная порода будет разрушена и в забое, и в кровле. Было выявлено, что верхняя часть и бока выработки в бежевом доломите подвержены избыточному давлению, исходя из этого можно прогнозировать, что в дальнейшем с этих участков может быть выдвлена порода в выработку. Рекомендуется крепить рассматриваемые участки анкерами СЗА и армокаркасами. Анализ состояния серого доломита на глубине 1210 и 1230 также показал, что в боку выработки с внутренней стороны спирального съезда горная порода может быть разрушена.

Наименьшие главные растягивающие деформации ε_3 развиваются в направлении действия ε_3 по закону Гука. На глубине 1210 и 1230 м в бежевом доломите в боках, в кровле выработки, до пят ее свода, и в верхней части забоя, от его груди, в массиве регистрируются зоны, где микродеформации $\mu\varepsilon > 500 - 700$. Микродеформация ($\mu\varepsilon = \varepsilon \cdot 10^{-6}$) (табл. 2) – единица измерения относительной деформации растяжения, рассчитываемой путем деления величины абсолютной деформации ΔL на исходную длину объекта L : $\varepsilon = \Delta L / L$. Зоны растягивающих деформаций являются потенциальными участками выбросоопасности, т.е. можно предположить,

что бежевые доломиты с этих зон массива выбрасывает в выработку при возникновении ГДЯ (рис. 5, б). В сером доломите на глубине 1210 и 1230 м деформации $\mu\epsilon < 500$.

Результаты моделирования по сценарию 2 (пласт бежевого доломита горизонтально пересекает выработку в центральной части) показали, что избыточные напряжения на глубине 1210 и 1230 в сером доломите в пределах нормы, а в бежевом доломите в забое и в боках превышают критические значения.

Коэффициент запаса прочности КЗП ≥ 1 в бежевом доломите в забое выработки и в сером доломите в боках выработки, поэтому горная порода не будет нарушена. В боках выработки в бежевом доломите с внутренней стороны спирального съезда горная порода может быть разрушена, так как КЗП < 1 .

Наименьшие главные деформации ϵ_3 развиваются по направлению действия σ_3 . Микродеформации $\mu\epsilon < 500$ в кровле выработки спирального съезда, $\mu\epsilon > 500$ в бежевом и сером доломитах, в боках и призабойной части.

Результаты моделирования по сценариям 3–6 (пласт бежевого доломита выходит с почвы на нижнюю часть забоя на высоту $1/3$, $2/9$, $1/9$ и $1/27$ от высоты выработки) показали, что избыточные напряжения на глубине 1210 и 1230 м в сером доломите отсутствуют, а в бежевом регистрируются. Худшая ситуация складывается при высоте выхода бежевого доломита на почву до $2/9$ от высоты выработки (≈ 2 м при высоте выработки 8 м и ≈ 1 м при высоте выработки 5 м), наименее плохая ситуация при $1/3$ от высоты выработки. Почва выработки в данных сценариях наиболее уязвима и находится в условиях высокого горного давления, являясь участком, потенциально склонным к ГДЯ.

Коэффициент запаса прочности КЗП: в бежевом доломите КЗП < 1 в почве

выработки и в нижней части забоя, от его груди в массиве, поэтому горная порода будет нарушена и в забое, и в почве. Выявлено, что нижняя часть выработки более подвержена избыточному давлению — порода из почвы и нижней части забоя может быть выдавлена в выработку. Худшим является сценарий 4. В сером доломите КЗП > 1 в боках выработки все в пределах нормы.

Наименьшие главные деформации ϵ_3 развиваются в направлении действия σ_3 . В бежевом доломите в почве, в угловых частях выработки микродеформации $\mu\epsilon > 500$ и образуются трещины растяжения в боках выработки. Худшим является сценарий 4. В сером доломите $\mu\epsilon < 500$.

Проведенный анализ на глубине ведения горных работ $H = 1710–1730$ м от земной поверхности при проходке СС и АУ показал схожую с глубиной $H = 1210–1230$ м качественную картину и закономерности распределения зон избыточных напряжений, КЗП и ϵ_3 , но количественные характеристики изменились. Величины избыточных напряжений $\Delta\sigma_1$ на глубине 1710 и 1730 м достигают 20 МПа, и встречаются случаи до 30 МПа, КЗП снижается до 0,5 и менее, а $\mu\epsilon$ достигает значений 800, в некоторых случаях более 1000.

Проведенный анализ показал, что наиболее неблагоприятная ситуация складывается при выходе пласта бежевого доломита в кровле выработки по сценарию 1 и в почве выработки — по сценариям 3, 4. Худший с точки зрения количественных характеристик напряженно-деформированного состояния выбросоопасного пласта бежевого доломита является сценарий 4. С точки зрения рисков также опасен сценарий 1, так как уязвима кровля выработки и близко расположенный вмещающий массив бежевого доломита. Объясняется это тем, что в случае, когда выбросоопасные

пласты доломита с более низкими прочностными свойствами выходят на забой с кровли или почвы, то они находятся в нагруженном (сжатом) состоянии, газовые коллекторы при этом закрыты. Когда выбросоопасный пласт выходит на забой выработки по сценарию 2, он частично разгружается, образуются искусственные коллекторы, особенно на контакте разномодульных пород и в зоне опорного давления, и происходит раскрытие трещин.

Полученные критические значения микродеформаций позволили выявить потенциально опасные участки массива горных пород, породы с которых выбрасывает в выработку во время ГДЯ при проведении взрывных работ. Хорошо в модели позиционируется местоположение этих зон и их размеры, которые можно эффективно откалибровать, проведя несколько ретроспективных анализов произошедших событий.

Результаты моделирования показали, что на формируемые во вмещающем массиве объемы потенциальных зон ГДЯ в бежевых доломитах оказывают прямое влияние размеры проходимых выработок. Чем больше сечение, тем большее влияние оказывают пустоты на вмещающий массив. В данном случае рекомендуется не уходить за проектное сечение выработок ($H = 4,5$ м, $B = 5,7$ м).

Проведен анализ взаимного влияния выработок СС и АУ на глубинах 1778–1820 и 1718–1853 м соответственно. Согласно результатам проведенного анализа установлено, что выработки СС и АУ на рассматриваемых глубинах не оказывают влияния друг на друга. Зона их влияния на вмещающий скальный массив ограничивается 1–2 их размерами.

Проведенный анализ по сценариям 1–3 зон влияния разломов на состояние АУ на глубине ведения горных ра-

бот $H = 1230$ м от земной поверхности при проходке АУ показал схожую с $H = 1210–1230$ м качественную картину и закономерности распределения зон избыточных напряжений, КЗП и ε_3 , но количественные характеристики изменились. Величины избыточных напряжений $\Delta\sigma_1$ на глубине 1710 и 1730 м достигают 20 МПа и встречаются случаи до 30 МПа, КЗП снижается до 0,5 и менее, и $\mu\varepsilon$ достигает значений 800, в некоторых случаях более 1000.

Следует отметить, что представленный сильно трещиноватый массив (геологический индекс прочности массива $GSI = 30–40$) в зонах влияния разломов подвержен упругопластическим деформациям, и механизм его деформирования отличается от ранее рассматриваемых упругих условий. Данные условия необходимо калибровать и уточнять в процессе ведения горных работ, так как они недостаточно коррелируются с реальными наблюдениями.

Рекомендуется периодическое применение подобного анализа и калибровка разработанной модели в течение всего периода проходки и поддержания выработок СС и АУ. В 2020 г. сотрудниками научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» в процессе проведения опытно-промышленных испытаний модель будет откалибрована.

Результаты ретроспективного анализа произошедших событий и моделирования показали, что размеры потенциально опасных зон ГДЯ бывают значительными как по площади, так и по объему. Обычной крепью и системами крепления их сложно локализовать непосредственно в момент ГДЯ, что и наблюдается на практике. При этом нарушается технологический процесс горного производства, что влечет за собой большие капитальные затраты.

Для минимизации негативного влияния ГДЯ обосновано применение «динамической» системы крепления при проходке и поддержании выработок в выбросоопасных пластах бежевого доломита. В состав системы входят конические анкеры с повышенной несущей способностью, у которых механизмом деформирования является пропахивание бетона в шпуре обратным ходом и высокопрочная поверхностная крепь сетка MINAX диаметром 4 мм со схожими параметрами.

Выводы

С учетом полученных результатов численного моделирования в программном комплексе Map3D исследованы структуры формирования вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов на руднике «Интернациональный» в диапазоне глубин $H = 1210 - 1730$ м.

Моделирование проводилось по шести сценариям выхода выбросоопасного бежевого доломита на забой выработки. Определялись значения избыточного напряжения $\Delta\sigma_1$, коэффициента запаса прочности КЗП и главные растягивающие деформации ε_3 в исследуемом массиве горных пород.

Проведенный анализ показал наиболее неблагоприятные ситуации, которые складываются при выходе пласта бежевого доломита в кровле выработки по сценарию 1 и в почве выработки по сценарию 3, 4. Худшим с точки зрения количественных характеристик напряжен-

но-деформированного состояния выбросоопасного пласта бежевого доломита является сценарий 4. С точки зрения рисков также опасен сценарий 1, так как уязвимы кровля выработки и близко расположенный вмещающий массив бежевого доломита.

Определено, что в случае, когда выбросоопасные пласты доломита с более низкими прочностными свойствами выходят на забой с кровли или почвы, то они находятся в нагруженном (сжатом) состоянии, газовые коллекторы при этом закрыты. Когда выбросоопасный пласт выходит на забой выработки по сценарию 2, он частично разгружается, образуются искусственные коллекторы, особенно на контакте разномодульных пород и в зоне опорного давления, и происходит раскрытие трещин.

Полученные критические значения микродеформаций позволили выявить потенциально опасные области массива горных пород, породы из которых выбрасывает в выработку во время ГДЯ при проведении ВР. Хорошо в модели позиционируется местоположение этих зон и их размеры, которые в настоящее время эффективно калибруются в процессе проведения ретроспективного анализа произошедших событий.

В работе принимали участие профессор А.В. Джигрин, сотрудники НИЦ «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» — Н.Г. Высотин, М.А. Косырева, А.Р. Умаров, А.М. Янбеков Ч.В. Хажыылай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АО НИИ Горной геомеханики и маркшейдерского дела — МНЦ «ВНИМИ» Уральский филиал. АК «АЛРОСА» (ПАО) Подземный рудник «Интернациональный». Указания по безопасному ведению горных работ на подземном руднике «Интернациональный» склонном к горным удара с глубины ниже 1245 м.

2. Коваленко А. А., Захаров Н. Е., Пуль Э. К., Золотин В. Г. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубки «Интернациональная» // Горный журнал. — 2019. — № 2. — С. 27 — 31.

3. *Cai M., Kaiser P. K.* Rockburst Support: Reference Book. Sudbury: Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.

4. *Li C. C.* Principles of rockbolting design // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9. Iss. 3. Pp. 396 – 414.

5. *Haeri H., Shahriar K., FatehiMarji M., Moarefvand P.* Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 67. Pp. 20 – 28.

6. *Fanzhen Meng, Hui Zhou, Zaiquan Wang, Liming Zhang, Liang Kong et al.* Experimental study on the prediction of Rockburst hazard induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 86. Pp. 210 – 223.

7. *Bahrani N., Hadjigeorgiou J.* Influence of stope excavation on drift convergence and support behavior: insights from 3D continuum and discontinuum // *Models Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. Vol. 51. Pp. 2395–2413.

8. *Paul A., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K.* Estimation of rock load in development workings of underground coal mines – A modified RMR approach // *Current Science*. 2018. Vol. 114(10). Pp. 2167 – 2174. DOI: 10.18520/cs/v114/i10/2167-2174.

9. *Souley M., Renaud V., Al Heib M., Lahaie F., Nyström A.* Numerical investigation of the development of the excavation damaged zone around a deep polymetallic ore mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 106. Pp. 165 – 175.

10. *Cheng G., Chen C., Li L., Zhu W., Yang T., Dai F., Ren B.* Numerical modelling of strata movement at footwall induced by underground mining // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 108. Pp. 142 – 156.

11. *Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В.* Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 12. – С. 74 – 83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.

12. *Зубов В. П.* Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // *Горный журнал*. – 2018. – № 6. – С. 77 – 83.

13. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В., Ларичкин Ф. Д., Воробьев А. Г.* Экономическое обоснование инновационных решений по снижению потерь сырья в алюминиевой отрасли России // *Горный журнал*. – 2018. – № 6. – С. 65 – 68.

14. *Колтышев В. Н., Шипеев О. В., Филиппов В. Н.* Особенности обработки рудных участков технологией с закладкой выработанного пространства в удароопасных условиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 8. – С. 107 – 112. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-107-112.


15. *Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Бабкин Е. А.* Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 1. – С. 5 – 17.

16. *Лушников В. Н., Сэнди М. П., Еременко В. А., Коваленко А. А., Иванов И. А.* Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // *Горный журнал*. – 2013. – № 12. – С. 11 – 16.

17. *Протосеня А. Г., Вербилло П. Э.* Оценка прочности блочного массива методом численного моделирования // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2016. – № 4. – С. 47 – 54.

18. *Map3D*. Available at: <http://www.vap3d.com/>

19. *Barton N., Lien R., Lunde J.* Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // *Rock Mechanics*. 1974. Vol. 6. No 4. Pp. 183 – 236.

20. Barton N. Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses. Workshop on Norwegian method of tunneling. New Delhi, 1993, pp. 66 – 84.
21. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1990. Vol. 90. No 10. Pp. 257–273.
22. Terzaghi K., Peck R. B. Soil mechanics in engineering practice. Wiley, New York, 1967.
23. Rocscience. Available at: <https://www.rocscience.com/> 

REFERENCES

1. AONII Gornoy geomekhaniki i marksheyderskogo dela – MNTS «VNIMI» Ural'skiy filial. AK «ALROSA» (PAO) Podzemnyy rudnik «Internatsional'nyy». Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornyx rabot na podzemnom rudnike «Internatsional'nyy» sklonnom k gornym udara s glubiny nizhe 1245 m [Guidelines on safe mining in rockburst-hazardous conditions in the Internatsionalny Mine at a depth below 1245 m. VNIMI Institute, Ural Division, ALROSA].
2. Kovalenko A. A., Zakharov N. E., Pul' E. K., Zolotin V. G. Geomechanical aspects of the Internatsionalnaya kimberlite pipe mining. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 2, pp. 27 – 31. [In Russ].
3. Cai M., Kaiser P. K. *Rockburst Support: Reference Book*. Sudbury: Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
4. Li C. C. Principles of rockbolting design. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9. Iss. 3. Pp. 396 – 414.
5. Haeri H., Shahriar K., FatehiMarjji M., Moarefvand P. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 67. Pp. 20 – 28.
6. Fanzhen Meng, Hui Zhou, Zaiquan Wang, Liming Zhang, Liang Kong et al. Experimental study on the prediction of Rockburst hazard induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 86. Pp. 210 – 225.
7. Bahrani N., Hadjigeorgiou J. Influence of stope excavation on drift convergence and support behavior: insights from 3D continuum and discontinuum. *Models Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. Vol. 51. Pp. 2395–2413.
8. Paul A., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines – A modified RMR approach. *Current Science*. 2018. Vol. 114(10). Pp. 2167 – 2174. DOI: 10.18520/cs/v114/i10/2167-2174.
9. Souley M., Renaud V., Al Heib M., Lahaie F., Nyström A. Numerical investigation of the development of the excavation damaged zone around a deep polymetallic ore mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 106. Pp. 165 – 175.
10. Cheng G., Chen C., Li L., Zhu W., Yang T., Dai F., Ren B. Numerical modelling of strata movement at footwall induced by underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 108. Pp. 142 – 156.
11. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zhuravleva O. G., Panteleev A. V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr Mine on January 9, 2018. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 12, pp. 74 – 83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
12. Zubov V. P. Applied technologies and current problems of resource-saving in underground mining of stratified deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 6, pp. 77 – 83. [In Russ].
13. Sidorov D. V., Ponomarenko T. V., Larichkin F. D., Vorob'ev A. G. Economic justification of innovative solutions on loss reduction in the aluminium sector of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 6, pp. 65 – 68. [In Russ].
14. Koltyshev V. N., Shipeev O. V., Filippov V. N. Features of ore mining with backfilling under conditions of rock burst hazard. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 8, pp. 107–112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-107-112.

15. Eremenko V.A., Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Babkin E.A. Assessment of the state of rocks in underground mines at the Polar Division of Norilsk Nickel. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 1, pp. 5–17.

16. Lushnikov V.N., Sendi M.P., Eremenko V.A., Kovalenko A.A., Ivanov I.A. Method of identifying failure zone of rock mass around mine workings and stopes by numerical modeling. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no 12, pp. 11–16. [In Russ].

17. Protosenya A.G., Verbilo P.E. Strength estimation of blocky rock mass by numerical modeling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2016, no 4, pp. 47–54. [In Russ].

18. Map3D. Available at: <http://www.vap3d.com/>

19. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 1974. Vol. 6. No 4. Pp. 183–236.

20. Barton N. *Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses. Workshop on Norwegian method of tunneling*. New Delhi, 1993, pp. 66–84.

21. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990. Vol. 90. No 10. Pp. 257–273.

22. Terzaghi K., Peck R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley, New York, 1967.

23. Rocscience. Available at: <https://www.rocscience.com/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Еременко Виталий Андреевич¹ — д-р техн. наук, профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС», e-mail: prof.eremenko@gmail.com,

Аксенов Захар Владленович¹ — аспирант, e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru,

Пуль Эдуард Константинович² — начальник отдела геотехнического мониторинга, e-mail: pulek@alrosa.ru,

Захаров Ньургун Егорович² — главный инженер, ¹ ГИ НИТУ «МИСиС»,

² Мирнинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО).

Для контактов: Еременко В.А., e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Eremenko¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Research Center for Applied Geomechanics and Convergent Technologies in Mining, NUST MISIS, e-mail: prof.eremenko@gmail.com,

Z.V. Aksenov¹, Graduate Student, e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru,

E.K. Pulek², Head of Geotechnical Monitoring Department, e-mail: pulek@alrosa.ru,

N.E. Zakharov², Chief Engineer,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia

² Mirny Mining and Processing Plant, ALROSA, Mirny, Russia.

Corresponding author: V.A. Eremenko, e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

Получена редакцией 24.01.2020; получена после рецензии 06.03.2020; принята к печати 20.04.2020.

Received by the editors 24.01.2020; received after the review 06.03.2020; accepted for printing 20.04.2020.