ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(5):5-17
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831.32 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_5

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОЙ РАЗГРУЗКИ УДАРООПАСНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

И.Ю. Рассказов[1], А.В. Сидляр[2], М.И. Потапчук[2], В.И. Мирошников[2]

[1] Хабаровский Федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия
[2] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия, e-mail: alex-igd@mail.ru

Аннотация: По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния выявлены закономерности формирования природно-техногенного поля напряжений в массиве горных пород Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам. Отработка на глубоких горизонтах приводит к формированию областей повышенных концентраций напряжений в целиках и кровле горно-подготовительных выработок, расположенных в районе формирующихся очистных камер, а также областей разгрузки (в бортах выработок и очистных камер). Для снижения удароопасности наиболее напряженных участков массива обосновано применение скважинной разгрузки и определены оптимальное расположение и параметры (ширина межскважинных перемычек и диаметр) разгрузочных скважин, обеспечивающие максимальное снижение напряженного состояния междуэтажных целиков на месторождении. Установлено, что уровень напряжений приконтурного массива для условий Николаевского месторождения определяется, в первую очередь, глубиной, на которой пройдена выработка, величиной угла между выработкой и направлением главных напряжений и типом пород. В результате была получена количественная зависимость, связывающая глубину заложения горных выработок, их ориентацию относительно главных напряжений и параметры бурения разгрузочных скважин, позволяющая обеспечить наиболее безопасные и эффективные условия ведения горных работ.

Ключевые слова: удароопасность, подземная отработка, массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, целик, численное моделирование, скважинная разгрузка, управление горным давлением.

Благодарность: Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663.

Для цитирования: *Рассказов И. Ю., Сидляр А. В., Потапчук М. И., Мирошников В. И.* Геомеханическое обоснование параметров скважинной разгрузки удароопасного массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_5.

© И.Ю. Рассказов, А.В. Сидляр, М.И. Потапчук, В.И. Мирошников. 2023.

Geomechanical validation of borehole stress-relief method in rockburst-hazardous rock mass

I.Yu. Rasskazov[1], A.V. Sidlyar[2], M.I. Potapchuk[2], V.I. Miroshnikov[2]

[1] Khabarovsk Federal Research Center of Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

[2] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: alex-igd@mail.ru

Abstract: The numerical stress–strain modeling has revealed the natural and induced stress patterns in the rockburst-hazardous rock mass of the Nikolaevsk polymetallic deposit. Deep-level mining induces higher stress concentrations in the roof and pillars in developing entries in the vicinity of stoping, and stress-relief zones in the sidewalls of the entries and stopes. With a view to reducing the rockburst hazard in the highest-stress areas, the borehole stress-relief method is validated and the borehole pattern design (diameter and spacing of boreholes) is optimized to ensure the maximum relaxation in the level pillars. It is found that in the conditions of the Nikolaevsk deposit, the stress level in rock mass surrounding the excavated stopes is governed, first of all, by the depth of the stope excavation, by the angle between the stope and the directions of the principal stresses, and by the type of rocks. The use of the resultant quantitative relationship between the stoping depth, orientation of the stopes relative to the principal stresses and the stress-relief drilling pattern makes it possible to ensure safe and efficient mining conditions.

Key words: rockburst hazard, underground mining, rock mass, stress–strain behavior, pillar, numerical modeling, borehole stress-relief method, ground control.

Acknowledgements: The study was carried out using the scientific equipment of the Shared-Use Center for Scientific Evidence Processing and Storage at the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-663.

For citation: Rasskazov I. Yu., Sidlyar A. V., Potapchuk M. I., Miroshnikov V. I. Geomechanical validation of borehole stress-relief method in rockburst-hazardous rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5):5-17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_5.

Введение

Проблема удароопасности при подземном освоении недр сохраняет свою актуальность многие десятилетия [1—4]. В Дальневосточном регионе России целый ряд рудных месторождений отнесены к склонным или опасным по горным ударам [5—7]. Опыт отработки удароопасных месторождений показывает, что при углублении горных работ и увеличении объема выработанных пространств происходит перераспределение исходных полей напряжений и активизация геодинамических процессов, что приводит к росту динамических проявлений горного давления. Безопасность и эффективность горных работ в подобных условиях во многом зависят от своевременного прогноза зон опасных концентраций напряжений, а также от точной оценки степени влияния очистной выемки и тектонической структуры месторождения на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов применяемой системы разработки. Это позволяет как на стадии про-

ектирования, так и в процессе эксплуатации месторождений, определять рациональные параметры конструктивных элементов систем разработки и безопасный порядок ведения горных работ.

Перспективным направлением исследования напряженного состояния конструктивных элементов систем разработки и окружающего массива является численное моделирование НДС методом конечных элементов (МКЭ), который широко используется для решения широкого круга геомеханических задач [8—11]. Применение данного метода дает возможность строить прогнозные карты НДС отдельных участков рудничного поля и моделировать процесс разгрузки массива горных пород в результате применения различных профилактических мероприятий.

Одним из наиболее удароопасных на Дальнем Востоке является Николаевское полиметаллическое месторождение, на котором зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, вплоть до мощных горных и горно-тектонических ударов. В последние годы здесь наблюдается усложнение геомеханической обстановки, выражающееся в росте числа и интенсивности динамических проявлений горного давления, а также в проявлении техногенной сейсмичности [7]. При этом остро встает вопрос научного обоснования мер безопасности и снижения геодинамического риска при ведении горных работ в удароопасных условиях.

Методика исследований

Моделирование НДС массива пород нижней части Николаевского месторождения осуществлялось с помощью программного комплекса FEM, обеспечивающего решение задач теории пластичности и упругости методом конечных элементов в плоской и объемной постановке [12].

Физико-механические свойства горных пород Николаевского месторождения, используемые при моделировании, определены как в лабораторных, так и в натурных условиях. Установлено, что руда и практически все вмещающие горные породы обладают высокой прочностью и упругостью, а также способны накапливать потенциальную энергию упругого сжатия и хрупко разрушаться в динамической форме [5, 13].

При задании нагрузок по границам модели учитывались результаты ранее проведенных геомеханических исследований, согласно которым в массиве Николаевского месторождения действует неравнокомпонентное исходное поле напряжений с преобладанием горизонтальных тектонических напряжений, в 1,5–2,5 раза превышающих вертикальную гравитационную составляющую.

Расчеты напряженно-деформированного состояния массива горных пород проводились при следующих граничных условиях:

- на глубине 600 м от поверхности (гор. –220 м) первые главные напряжения (координата *Y*) принимались равными σ_1 = 41,72 МПа и были направлены в крест простирания рудной залежи, вторые главные напряжения (координата *X*) принимались равными σ_2 = 24,72 и были направлены по простиранию рудной залежи. Напряжения, действующие в вертикальной плоскости (координата *Z*), принимались равными σ_3 = 16,48;
- на глубине 900 м от поверхности (гор. –520 м) σ_1 = 61,8 МПа, σ_2 = 31,1 МПа, σ_3 = 24,72 МПа.

Сдвиговые компоненты τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} принимались равными 0.

Анализ напряжений в массиве горных пород и их представление в виде изолиний производилось по значениям максимальных сжимающих и растягивающих напряжений, а также средних нормальных и касательных напряжений.

В объемной постановке задачи:

$$\sigma_{ср} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

$$\tau_{инт} = \frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_{ср})^2 + (\sigma_2 - \sigma_{ср})^2 + (\sigma_3 - \sigma_{ср})^2}.$$

Для обоснования мер безопасности при отработке удароопасного Николаевского месторождения прежде всего необходимо определить уровень напряжений в наиболее напряженных конструктивных элементах системы разработки, сопоставив их с прочностными свойствами рудного и породного массивов.

Результаты моделирования

Оценка НДС конструктивных элементов применяемой камерной системы разработки осуществлялась на примере последовательной отработки камер *3* и *4* блока *7* рудной залежи «Харьковская», рис. 1 [14]. Моделировали четыре этапа отработки:

- после полной отработки камеры *2* блока *7* (до начала отработки камер *3* и *4* блока *7*);
- отработка камер *3* и *4* блока *7* на гор. –287 м;
- отработка камер *3* и *4* блока *7* на гор. –307 м;
- отработка камер *3* и *4* блока *7* на гор. –323 м (после полной отработки камер *3* и *4* блока *7*).

Анализ результатов математического моделирования показал, что в районе камер *3*, *4* под влиянием очистных работ блока *7* происходит формирование сложного поля напряжений, характеризующегося наличием как областей разгрузки (в бортах выработок и очистных камер), так и высоких концентраций напряжений в краевых частях массива и кровле штреков.

В процессе выемки запасов блока на гор. –287 м и –307 м существенного изменения геомеханической ситуации не происходит. Наибольшие изменения наблюдаются на гор. –323 м после полной отработки блока (рис. 1).

До начала отработки камер средние значения напряжений в кровле находились в диапазоне 70—80 МПа. После полной отработки камер *3* и *4* блока *7* наблюдается увеличение сжимающих напряжений на 10—15%. Максимальный уровень напряжений (до 112 МПа) выявлен в кровле выработок, расположенных перпендикулярно действию максимальных напряжений в зоне опорного давления очистных блоков, отработанных на вышележащих горизонтах (рис. 2).

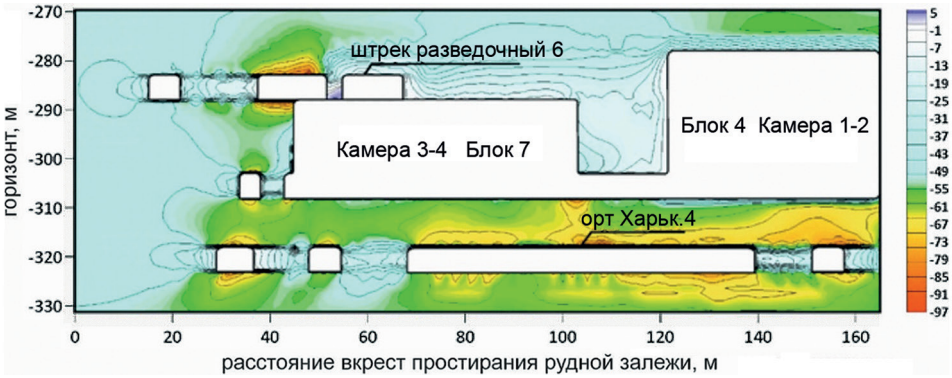

Рис. 1. Распределение горизонтальных напряжений σ_y (МПа) после полной отработки камер 3 и 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская» в проекции на разрез 43–43

Fig. 1. Distribution of horizontal stresses σ_y after complete mining of chambers 3 and 4 of block 7 of Kharkov ore deposit in the projection on section 43–43

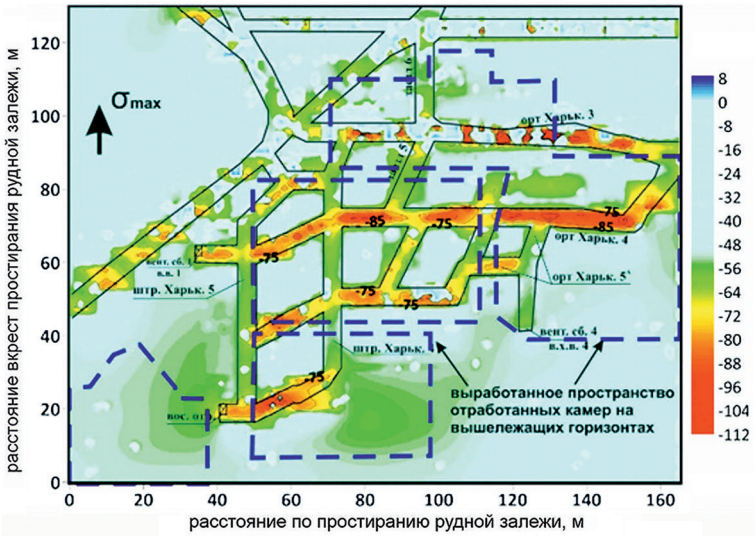

Рис. 2. Распределение горизонтальных напряжений σ_y (МПа) в кровле горных выработок, расположенных на гор. –323 м после полной отработки камер 3 и 4 блока 7 рудной залежи «Харьковская»

Fig. 2. Distribution of horizontal stresses σ_y in the roof of mine workings located on the horizon –323 m after complete mining of chambers 3 and 4 of block 7 of Kharkov ore deposit

Таким образом, по результатам моделирования НДС массива пород нижней части Николаевского месторождения установлено, что при ведении очистных работ наиболее высокая концентрация сжимающих напряжений наблюдается в кровле горизонтальных выработок, расположенных непосредственно под очистными блоками.

Обоснование параметров скважинной разгрузки

Одним из проверенных и надежных способов снижения удароопасности горных конструкций и краевых частей массива горных пород является скважинная разгрузка. Эффективность его основана на использовании энергии горного давления и зависит от правильного выбора параметров: диаметра, ориентировки, глубины и расстояния между скважинами [15 – 20].

Определение оптимального расположения и параметров разгрузочных скважин, обеспечивающих максимальное снижение напряженного состояния междуэтажных целиков на Николаевском месторождении, проводилось на основании результатов моделирования, представленных на рис. 1 и 2.

Всего было рассмотрено 4 модели:

- без разгрузочных скважин;
- с вертикальными разгрузочными скважинами в кровле штрека длиной 5 м;
- с горизонтальными скважинами в бортах штрека;
- с наклонными скважинами в бортах выработки под углом 45°.

Результаты моделирования показали, что максимальная концентрация напряжений наблюдается в кровле выработки и в краевых частях очистной камеры. При этом горизонтальные и наклонные разгрузочные скважины в бортах штрека разгружают лишь ограниченную область в бортах выработки, а напряжения в кровле и целиках остаются практически без изменения. Вместе с тем, бурение строчки вертикальных скважин в кровле штрека приводит к более значительному перераспределению напряжений и разгрузке массива горных пород.

Следует также отметить, что на начальном этапе бурение разгрузочных скважин приводит к появлению относительно небольшой разгруженной зоны в кровле штрека (рис. 3, *а*, *б*). Для большего разгружающего эффекта необходимо обеспечить саморазрушение межскважинных перемычек и образование сплошной разгрузочной щели (рис. 3, *в*, *г*). Это, в свою очередь, требует более детального изучения формирующегося в районе очистных блоков поля напряжений с учетом различного расположения подготовительных и нарезных выработок относительно очистного пространства и ориентировки главных напряжений.

С этой целью было выполнено моделирование 5 вариантов расположения штрека под очистным пространством на глубине 600, 700, 800 и 900 м при его различной ориентировке относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений σ_{max}: параллельно максимальным сжимающим напряжениям; под углом 30°; под углом 45°; под углом 60°; перпендикулярно максималь-

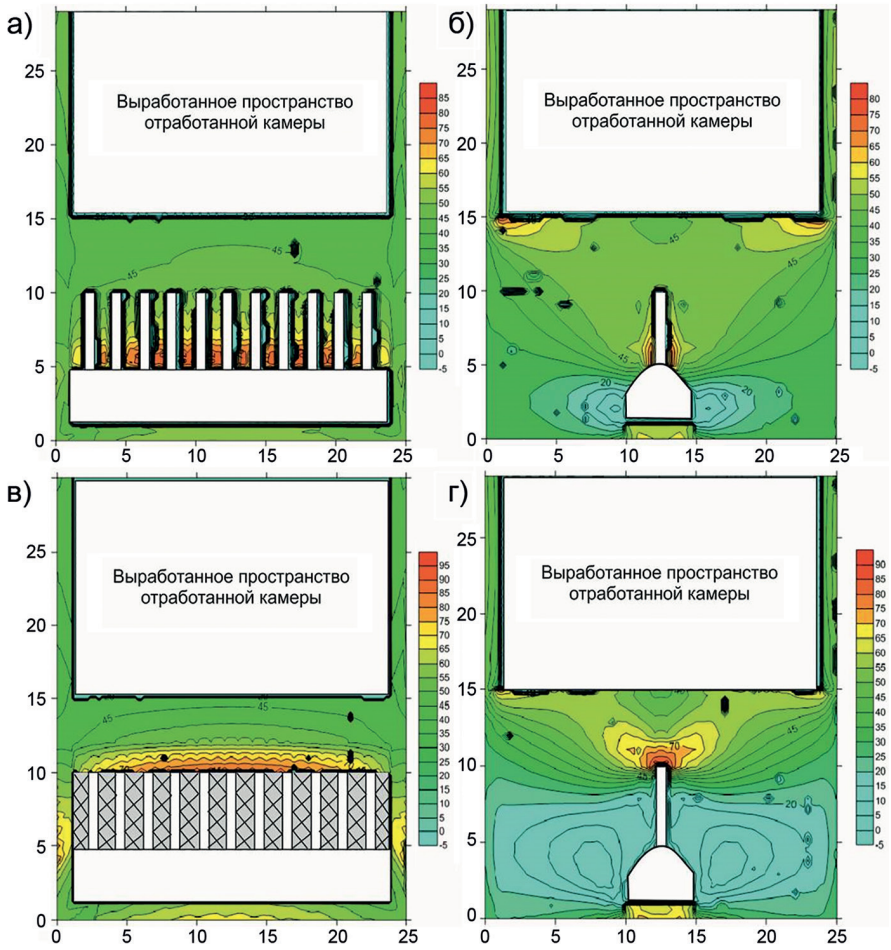

Рис. 3. Распределение максимальных горизонтальных напряжений σ_x в процессе бурения разгрузочных скважин (а, б) и после их разрушения и образования разгрузочной щели (в, г)

Fig. 3. Distribution of maximum horizontal stresses σ_x during drilling of relief boreholes (a, b) and after their destruction and formation of a relief slot (v, g)

ным сжимающим напряжениям. Результаты моделирования позволили выявить особенности напряженного состояния кровли штрека, расположенного под выработанным пространством очистной камеры, в зависимости от различных направлений главных сжимающих напряжений σ_{max} и глубины отработки.

На рис. 4 представлены графики распределения максимальных сжимающих напряжений σ_y в кровле штрека, расположенного под очистной камерой, в зависимости от направления главных сжимающих напряжений при различной глубине отработки.

Установлено, что при отработке выше гор. –220 м (глубина 600 м) уровень действующих напряжений достигает 79 МПа, что не превышает предельно допустимых значений при любом возможном расположении штрека относительно направления действия σ_{max}. Максимальные концентрации напряжений наблюдаются при увеличении глубины и расположении штрека перпендикулярно направлению действия σ_{max} (рис. 4).

Рассчитанные значения максимальных сжимающих напряжений σ_y в кровле штрека в зависимости от его расположения по отношению к направлению главных напряжений на различной глубине (рис. 4) были аппроксимированы в среде Mathlab:

$$\sigma_{max} = 39{,}3 - 0{,}1034 \cdot z - \\ -(10{,}86 - 0{,}0286 \cdot z) \cdot \cos(\alpha \cdot \pi / 90), \quad (1)$$

где σ_{max} — максимальные сжимающие напряжения в кровле выработки, МПа; z — горизонт расположения выработки, м; α — угол между выработкой и направлением максимальных сжимающих напряжений, град.

При оценке прочности горных пород наиболее часто применяют критерий хрупкого разрушения, обусловленного превышением максимальных прочностных характеристик пород в массиве. Он определяется как превышение максимальных сжимающих напряжений над пределом прочности пород на сжатие с учетом нарушенности массива [21]:

$$\sigma_{max} \leqslant K_s \cdot \sigma_{сж}, \quad (2)$$

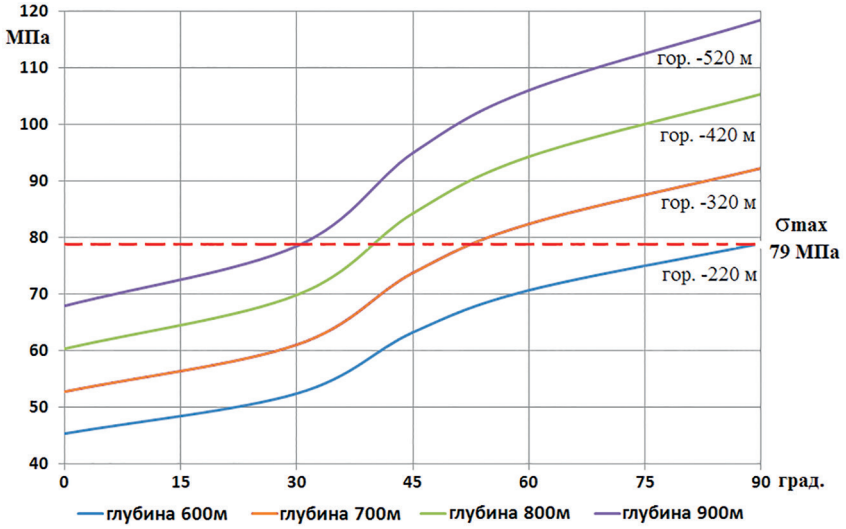

Рис. 4. Изменение максимальных сжимающих напряжений σ_y в кровле штрека в зависимости от угла его расположения по отношению к направлению главных напряжений и глубины ведения горных работ

Fig. 4. Change in the maximum compressive stresses σ_y in the top of the drift, depending on the angle of its location with respect to the direction of the main stresses and the depth of mining

Таблица 1

Прочностные свойства горных пород Николаевского месторождения и критерии хрупкого и сдвигового разрушения
Strength properties of rocks of the Nikolaevsk deposit and criteria for brittle and shear fracture

Тип породы	Коэффициент структурного ослабления K_s	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Предельное сжимающее напряжение σ_{max}, МПа
Рудный скарн	0,8	98	78,4
Известняк	0,8	99	79,2
Туфы кварцевых порфиров	0,8	99,6	79,7
Безрудный геденбергитовый скарн	0,8	135,2	108,1

где σ_{max} — максимальные сжимающие напряжения, действующие в массиве, МПа; K_s — коэффициент структурного ослабления; $\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие, МПа.

Предельные значения напряжений, выступавшие критериями разрушения для условий Николаевского месторождения, представлены в табл. 1. Полученные данные использованы для оценки удароопасности конструктивных элементов системы разработки Николаевского месторождения путем сопоставления предельно допустимых расчетных значений прочностных свойств пород (табл. 1) с результатами моделирования НДС.

Воспользуемся критерием хрупкого разрушения и, поменяв знак неравенства, объединим формулы (1) и (2) и получим:

$$39,3 - 0,1034 \cdot z - \\ -(10,86 - 0,0286 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > K_s \cdot \sigma_{сж} \quad (3)$$

Таким образом, для условий Николаевского месторождения уровень напряжений приконтурного массива (а соответственно, и целесообразность проведения разгрузочных мероприятий) определяется, в первую очередь, глубиной, на которой пройдена выработка, величиной угла между выработкой и направлением главных напряжений и типом пород. Для различных типов пород критерий удароопасности имеет следующий вид:

- для массива, сложенного известняком:

$$39,3 - 0,1034 \cdot z - \\ -(10,86 - 0,0286 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > 79,2; \quad (4)$$

- для массива, сложенного туфами:

$$39,3 - 0,1034 \cdot z - \\ -(10,86 - 0,0286 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > 79,7; \quad (5)$$

- для массива, сложенного скарнами:

$$39,3 - 0,1034 \cdot z - \\ -(10,86 - 0,0286 \cdot z) \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{90}\right) > 108,1. \quad (6)$$

Полученные зависимости использованы для обоснования параметров скважинной разгрузки (в первую очередь, расстояния между скважинами) при проведении горно-подготовительных и нарезных выработок на подэтажах перед началом отработки очистных блоков на глубинах более 800 м (ниже гор. –420 м).

По результатам множественной аппроксимации получены оптимальные значения ширины межскважинного целика *b* и отношения *b/d* для используемого на Николаевском руднике диаметра бурения разгрузочных скважин (d = = 0,105 м), которые обеспечивают наиболее эффективную разгрузку массива (табл. 2). Рекомендуемые значения отношения *b/d* разгрузочных скважин для различных вариантов ориентировки вы-

Таблица 2

Рекомендуемые значения ширины межскважинного целика b и отношения b/d для используемого на Николаевском месторождении диаметра бурения разгрузочных скважин 0,105 м
The recommended distances between boreholes b and b/d ratio for the diameter of relief boreholes used at the Nikolaevsk field (d = 0.105 m)

Максимальные сжимающие напряжения в кровле выработки σ_{max}, МПа	Расположение выработки относительно направления максимальных сжимающих напряжений			
	перпендикулярное (90°)		параллельное (0°)	
	расстояние между скважинами *b*, м	отношение *b/d*	расстояние между скважинами *b*, м	отношение *b/d*
$0{,}8*\sigma_{сж}$ = 79,2	0,179	1,705	0,137	1,305
$0{,}85*\sigma_{сж}$ = 84,15	0,244	2,324	0,192	1,829
$0{,}9*\sigma_{сж}$ = 89,1	0,329	3,133	0,262	2,495

работки относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений (под углом 0°, 45° и 90°) представлены на рис. 5.

При перпендикулярном расположении выработки относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений аппроксимированные функции будут иметь вид

$$b / d = 0{,}0039 \cdot \sigma_{max}^2 - 0{,}508 \cdot \sigma_{max} + 17{,}64\,, \quad (7)$$

$$b = 0{,}000407 \cdot \sigma_{max}^2 - 0{,}0534 \cdot \sigma_{max} + 1{,}85\,. \quad (8)$$

При параллельном расположении выработки относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений:

$$b / d = 0{,}0029 \cdot \sigma_{max}^2 - 0{,}367 \cdot \sigma_{max} + 12{,}23\,, \quad (9)$$

$$b = 0{,}000304 \cdot \sigma_{max}^2 - 0{,}0386 \cdot \sigma_{max} + 1{,}29\,. \quad (10)$$

Рассчитав средние значения, получим оптимальные значения ширины межскважинного целика (*b*, м) и отношения *b/d* разгрузочных скважин диаметром *d* = 0,105 м для трассировки подготови-

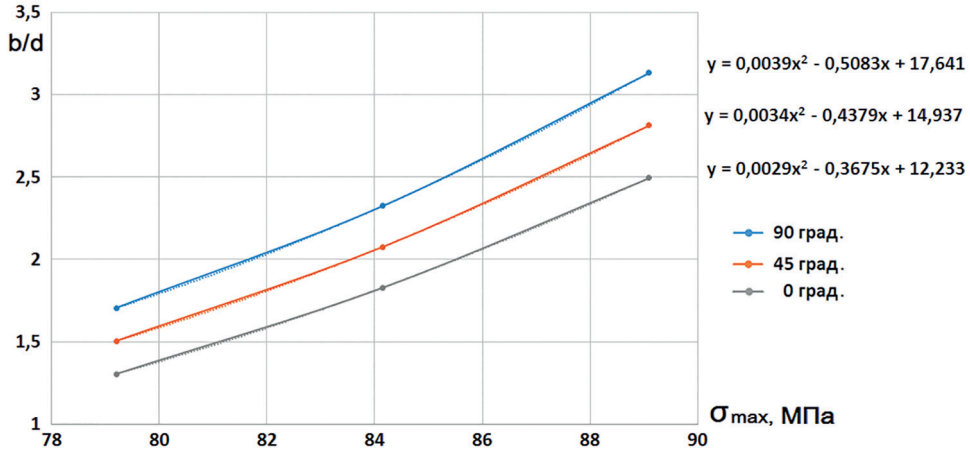

Рис. 5. Рекомендуемые значения b/d разгрузочных скважин при ориентации выработки под углами 0°, 45° и 90° к направлению действия максимальных сжимающих напряжений

Fig. 5. Recommended values of b/d of relief boreholes at the orientation of mine working at angles of 0°, 45° and 90° to the direction of maximum compressive stresses

тельных выработок под углом 45° к направлению действия максимальных сжимающих напряжений, обеспечивающей необходимое снижение напряжений:

$$b / d = 0,0034 \cdot \sigma_{max}^2 - 0,438 \cdot \sigma_{max} + 14,94 , \quad (11)$$

$$b = 0,000356 \cdot \sigma_{max}^2 - 0,046 \cdot \sigma_{max} + 1,57 . \quad (12)$$

Подставив в формулу (1) значение α = 45°, получим:

$$\sigma_{max} = 0,1034 \cdot H , \quad (13)$$

где H — глубина расположения разгружаемой выработки, м.

Объединим выражение (13) с формулами (11) и (12) и, раскрыв скобки, получим:

$$b / d = 0,000036 \cdot H^2 - 0,0453 \cdot H + 14,94 , \quad (14)$$

$$b = 0,0000038 \cdot H^2 - 0,000476 \cdot H + 1,57 . \quad (15)$$

Полученные зависимости дают возможность определять оптимальные параметры скважинной разгрузки массива горных пород при отработке запасов нижней части Николаевского месторождения.

Заключение

По результатам математического моделирования напряженно-деформированного состояния камерной системы разработки Николаевского месторождения выявлены высокие концентрации горизонтальных сжимающих напряжений (до 112 МПа) в кровле выработок, расположенных перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений, в зоне опорного давления очистных блоков, отработанных на вышележащих горизонтах. Уровень напряжений в надштрековых целиках превышает предельно допустимые значения (79 МПа) при расположении горных выработок на глубинах более 600 м (ниже гор. –220 м).

Для снижения опасных концентраций в межэтажных целиках необходимо бурение вертикальных разгрузочных скважин в кровле подготовительных выработок. Оптимальное расстояние между скважинами для образования разгрузочной щели в значительной степени определяется ориентацией выработки относительно направления действия максимальных сжимающих напряжений.

По результатам множественной аппроксимации установлена зависимость, связывающая глубину заложения выработок, их ориентацию относительно главных напряжений и параметры бурения разгрузочных скважин. Для создания защитной зоны расстояние между скважинами для предложенного варианта трассировки подготовительных выработок (расположенных под углом 45° к направлению действия максимальных сжимающих напряжений) должно составлять 1,5 — 3 диаметра скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simser B. P.* Rock burst management in Canadian hard rock mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 5, pp. 1036 — 1043. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.005.

2. *Keneti A., Sainsbury B.* Review of published rockburst events and their contributing factors // Engineering Geology. 2018, vol. 246, pp. 361 — 373. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.005 ENGEO 4964.

3. *Jun Wang, Apel D. B., Yuanyuan Pu, Hall R., Chong Wei, Sepehri M.* Numerical modeling for rockbursts. A state-of-the-art review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021, vol. 13, pp. 457 — 478. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.011.

4. *He Shengquan, Tuo Chen, Isaac Vennes, Xue-qiu He, Dazhao Song, Jianqiang Chen, Mitri H. S.* Dynamic modelling of seismic wave propagation due to a remote seismic source: A case study // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, vol. 53, pp. 5177—5201. DOI: 10.1007/s00603-020-02217-w.

5. *Рассказов И. Ю.* Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Изд-во «Горная книга», 2008. — 329 с.

6. *Рассказов И. Ю.*, *Курсакин Г. А.*, *Потапчук М. И.*, *Мирошников В. И.*, *Фрейдин А. М.*, *Осадчий С. П.* Геомеханическая оценка условий разработки глубоких горизонтов полиметаллического месторождения «Южное» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 5. — С. 125—134.

7. *Рассказов И. Ю.*, *Саксин Б. Г.*, *Усиков В. И.*, *Потапчук М. И.* Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 13—19. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03.

8. *Козырев А. А.*, *Лукичев С. В.*, *Наговицын О. В.*, *Семенова И. Э.* Геомеханическое и горно-технологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 4. — С. 73—83.

9. *Wang Jianchao, Guo-qing Chen, Xiao Yaxun, Shaojun Li, Yi Chen, Zhibin Qiao* Effect of structural planes on rockburst distribution: Case study of a deep tunnel in Southwest China // Engineering Geology. 2021, vol. 292, artcle 106250. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106250.

10. *Семенова И. Э.*, *Аветисян И. М.*, *Земцовский А. В.* Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 65—73. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-65-73.

11. *Жирнов А. А.*, *Шапошник Ю. Н.*, *Никольский А. М.*, *Неверов С. А.* Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на Иртышском месторождении и обоснование параметров систем разработки // Горный журнал. — 2018. — № 1. — С. 48—53. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.08.

12. *Зотеев О. В.* Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами // Известия вузов. Горный журнал. — 2003. — № 5. — С. 108—115.

13. *Барышников В. Д.*, *Пирля К. В.*, *Шумский И. П.* Результаты исследований физико-механических свойств горных пород Николаевского месторождения / Физические свойства горных пород. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. — С. 131—135.

14. *Сидляр А. В.*, *Потапчук М. И.*, *Терешкин А. А.* Геомеханическое обоснование мер безопасности при разработке Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 7. — С. 184—194. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-184-194.

15. *Петухов И. М.*, *Егоров П. В.*, *Винокур Б. Ш.* Предотвращение горных ударов на рудниках. — М.: Недра, 1984. — 230 с.

16. *Марысюк В. П.*, *Корнейчук В. И.*, *Фендер С. Н.*, *Андреев А. А.*, *Корецкий А. С.* Совершенствование способов разгрузки массива скважинами большого диаметра при отработке сульфидных руд // Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 15—18.

17. *Полухин В. А.*, *Скобликов В. В.* Способ повышения устойчивости выемочных и магистральных горных выработок // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2008. — № 2. — С. 113—117.

18. *Zhu Qi-hu, Lu Wen-bo, Sun Jin-shan, Chen Ming* Prevention of rockburst by guide holes based on numerical simulations // Mining Science and Technology. 2009, vol. 19, pp. 346—351.

19. *Карпов Г. Н.*, *Ковальский Е. Р.*, *Смычник А. Д.* Определение параметров разгрузки массива горных пород на концевых участках демонтажной камеры // Горный информа-

ционно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 95—107. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-95-107.

20. *Казикаев Д. М.* Геомеханика подземной разработки руд. — М.: Изд-во МГГУ, 2009. — 542 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 5, pp. 1036—1043. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.005.

2. Keneti A., Sainsbury B. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018, vol. 246, pp. 361—373. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.005 ENGEO 4964.

3. Jun Wang, Apel D. B., Yuanyuan Pu, Hall R., Chong Wei, Sepehri M. Numerical modeling for rockbursts. A state-of-the-art review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 13, pp. 457—478. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.011.

4. He Shengquan, Tuo Chen, Isaac Vennes, Xue-qiu He, Dazhao Song, Jianqiang Chen, Mitri H. S. Dynamic modelling of seismic wave propagation due to a remote seismic source: A case study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 5177—5201. DOI: 10.1007/s00603-020-02217-w.

5. Rasskazov I. Yu. *Kontrol' i upravlenie gornym davleniem na rudnikakh Dal'nevostochnogo regiona* [Control and management of rock pressure at the mines of the Far East region], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 329 p.

6. Rasskazov I. Yu., Kursakin G. A., Potapchuk M. I., Miroshnikov V. I., Freidin A. M., Osadchiy S. P. Geomechanical assessment of conditions for the development of deep horizons of the Yuzhnoye polymetallic deposit. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no. 5, pp. 125—134. [In Russ].

7. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Usikov V. I., Potapchuk M. I. Geodynamic state of the rock massif of the Nikolaevsk polymetallic deposit and features of rockburst hazard manifestation during its development. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 13—19. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03.

8. Kozyrev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E. Geomechanical and mining-technological modeling as a means of improving the safety of mining deposits of solid minerals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 4, pp. 73—83. [In Russ].

9. Wang Jianchao, Guo-qing Chen, Xiao Yaxun, Shaojun Li, Yi Chen, Zhibin Qiao Effect of structural planes on rockburst distribution: Case study of a deep tunnel in Southwest China. *Engineering Geology*. 2021, vol. 292, artcle 106250. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106250.

10. Semenova I. E., Avetisyan I. M., Zemtsovsky A. V. Geomechanical modeling of deep-level mining under difficult geological and geodynamic conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 12, pp. 65—73. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-65-73.

11. Zhirnov A. A., Shaposhnik Yu. N., Nikolsky A. M., Neverov S. A. Geomechanical assessment of the mining situation at the Irtysh deposit and substantiation of development system parameters. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 1, pp. 48—53. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.08.

12. Zoteev O. V. Simulation of the mode of deformation of a rock mass by numerical methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2003, no. 5, pp. 108—115. [In Russ].

13. Baryshnikov V. D., Pirlya K. V., Shumsky I. P. Results of studies of the physical and mechanical properties of rocks of the Nikolaev deposit. *Fizicheskie svoystva gornykh porod* [Physical Properties of Rocks], Novosibirsk, IGD SO AN SSSR, 1982, pp. 131—135.

14. A.V. Sidlyar, M.I. Potapchuk, A.A. Tereshkin Geomechanical confirmation of safe mining at Nikolaevskoye polymetallic deposit, which is rock bursts dangerous. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 7, pp. 184—194. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-184-194.

15. Petukhov I. M., Egorov P. V., Vinokur B. Sh. *Predotvrashchenie gornykh udarov na rudnikakh* [Prevention of rock bursts at mines], Moscow, Nedra, 1984, 230 p.

16. Marysyuk V. P., Korneichuk V. I., Fender S. N., Andreev A. A., Koretsky A. S. Improvement of massif relief methods by large-diameter wells when mining sulfide ores. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 4, pp. 15—18. [In Russ].

17. Polukhin V. A., Skoblikov V. V. Method for increasing the stability of excavation and main mine workings. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2008, no. 2, pp. 113—117. [In Russ].

18. Zhu Qi-hu, Lu Wen-bo, Sun Jin-shan, Chen Ming Prevention of rockburst by guide holes based on numerical simulations. *Mining Science and Technology*. 2009, vol. 19, pp. 346—351.

19. Karpov G. N., Kovalski E. R., Smychnik A. D. Determination of rock destressing parameters at the ends of disassembling room. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 95—107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-95-107.

20. Kazikaev D. M. *Geomekhanika podzemnoy razrabotki rud* [Geomechanics of underground mining of ores], Moscow, Izd-vo MGGU, 2009, 542 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рассказов Игорь Юрьевич — член-корр. РАН,
д-р. техн. наук, директор,
Хабаровский Федеральный исследовательский
центр ДВО РАН, e-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
Сидляр Александр Владимирович[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: alex-igd@mail.ru,
Потапчук Марина Игоревна[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: potapchuk-igd@mail.ru,
Мирошников Владимир Иванович[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: mirosh19@bk.ru,
[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.
Для контактов: Сидляр А.В., e-mail: alex-igd@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.Yu. Rasskazov, Dr. Sci (Eng.),
Corresponding Member of Russian Academy of Sciences,
Director, Khabarovsk Federal Research Center
of Far Eastern branch of Russian Academy
of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia,
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
A.V. Sidlyar[1], Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, e-mail: alex-igd@mail.ru,
M.I. Potapchuk[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: alex-igd@mail.ru,
V.I. Miroshnikov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, e-mail: mirosh19@bk.ru,
[1] Mining Institute, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: A.V. Sidlyar, e-mail: alex-igd@mail.ru.

Получена редакцией 09.08.2022; получена после рецензии 17.02.2023; принята к печати 10.04.2023.
Received by the editors 09.08.2022; received after the review 17.02.2023; accepted for printing 10.04.2023.