

**И.Ю. Рассказов, М.И. Потапчук, С.П. Осадчий,
Г.М. Потапчук**

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЯЕМЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ УДАРООПАСНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОАО «ГМК «ДАЛЬПОЛИМЕТАЛЛ»**

Методом численного моделирования исследованы особенности формирования техногенного поля при разработке удароопасных месторождений ОАО «ГМК «Дальполиметалл». В процессе исследований были установлены важные закономерности формирования сложного техногенного поля напряжений в условиях влияния различные природных и технологических факторов. Были выделены потенциально удароопасные участки массива горных пород и предложены мероприятия по предотвращению динамических проявлений горного давления. Ключевые слова: удароопасное месторождение, горное давление, геомеханическая ситуация, магазинирование.

Семинар № 16

Проблема удароопасности на подземных рудниках Дальневосточного региона не теряет своей актуальности уже несколько десятилетий. Горное давление неизбежное при подземной разработке в условиях глубоких горизонтов и высокой тектонической напряженности массива создает серьезную угрозу жизни работающим, нарушает нормальный ход ведения горных работ и тем самым снижает эффективность горного производства.

Решение проблемы управления горным давлением во многом сдерживается из-за недостаточной изученности природы и механизма геодинамических процессов и явлений, возникающих в массиве горных пород под влиянием многочисленных природных и техногенных факторов.

Среди месторождений Дальневосточного региона, характеризующихся наиболее сложными условиями залегания, можно выделить Николаевское и Южное месторождения, представленные широким спектром лито-

логических наименований пород осадочного, вулканогенно-осадочного и интрузивного происхождения. Сложная геометрия формирующихся выработанных пространств, наличие разнообразных целиков, а также способность вмещающих пород и руд к накоплению потенциальной энергии упругого сжатия, приводит к перераспределению и опасной концентрации напряжений в разрабатываемом рудном и породном массивах. Отмечены многочисленные случаи динамических проявлений горного давления в процессе разработки месторождений, в результате чего они отнесены к категории опасных по горным ударам: Николаевское – с глубины ниже горизонта – 120 м (вертикальная глубина около 600 м), а Южное – с глубины ниже горизонта +760 м (вертикальная глубина 180–200 м). Анализ геомеханической ситуации на месторождениях свидетельствует, что с углублением горных работ происходит существенный рост количества и интенсивности опасных

динамических проявлений, в большинстве случаев это можно объяснить высоким уровнем действующих в массивах тектонических напряжений. Существенная неоднородность естественных полей напряжений, предопределяемая сложностью и особенностями тектонической структуры месторождений, еще больше усиливается при техногенном воздействии на породный массив в результате ведения горных работ. Перераспределение исходных напряжений и их опасная концентрация на отдельных участках является главной причиной опасных динамических проявлений горного давления на месторождениях. В этой связи геомеханическая оценка применяемой технологии разработки, имеет первоочередное значение для обоснования мероприятий по управлению горным давлением на месторождениях.

Исследования геомеханических процессов в удароопасном массиве горных пород проводились с применением численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) в плоской и объемной постановке задач [1, 2]. Применение данного метода дает возможность не только строить прогнозные карты напряженно-деформированного состояния (НДС) отдельных участков массива горных пород, но и установить важные закономерности формирования техногенных полей напряжений, учитывающие геолого-тектоническое строение месторождения и параметры применяемых технологических схем.

При задании граничных условий опирались на ранее выполненные гео-механические исследования, включая результаты изучения регионального поля напряжений, согласно которым в массиве горных пород на достигнутых горными работами глубинах преобладают субгоризонталь-

ные сжимающие напряжения, ориентированные в направлении ЗЮЗ и в 1,5–2,5 раза превышающие по величине гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород [3, 4]. Физико-механические свойства принимались по данным многолетних экспериментальных исследований, которые свидетельствуют о высоких прочностных и упругих характеристиках руд и вмещающих пород месторождений, и склонности их к разрушению в динамической форме.

Южное месторождение относится к жильному типу, рудые тела прослеживаются с поверхности по простиранию на 1000 м и по падению – на 520 м. Жила мощностью 0,05–3,75 м сложена массивными полосчатыми сульфидными и кварц-карбонатно-сульфидными рудами. Вмещающие породы представлены переслаивающимися песчаниками и алевролитами.

В настоящее время очистная выемка ведется в этаже 480–550 м, ниже горизонта 440 м ведутся горно-подготовительные и горно-капитальные работы. С начала эксплуатации месторождения основной системой разработки была выемка с магазинированием отбитой руды и отработкой очистных блоков в направлении снизу вверх на уменьшающийся подштрековый целик. В результате на относительно небольших глубинах (170 м от поверхности) имели место сильные горные удары, что потребовало перехода на наиболее эффективную и безопасную систему отработки. В настоящее время Южное месторождение отрабатывается системой подэтажных штреков с выемкой по падению при угле наклона рудного тела до 50° или по простиранию при большем угле. Но для отработки запасов в этаже 440–480 м, в условиях

высокой изменчивости элементов залегания рудных тел (угла падения и

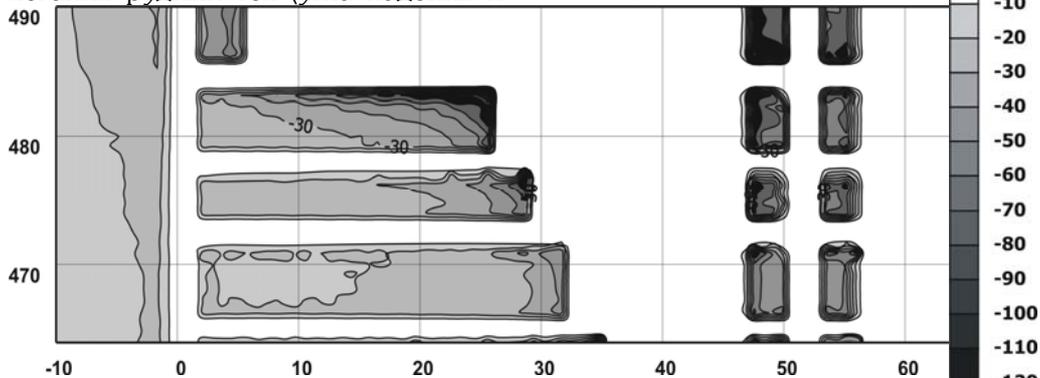


Рис. 1. Распределение средних нормальных напряжений σ_{cp} в целиках при отработке соседнего очистного блока (в проекции на наклонную плоскость при $m = 3$ м; $\beta = 40^\circ$)

мощности жил) для снижения удароопасности была предложена технология с комбинированием двух вариантов системы разработки: подэтажными штреками (для отработки верхней части блока) и с распорной крепью (в нижней части).

При отработке верхней части блока с применением системы разработки подэтажными штреками для улучшения показателей извлечения, был предложен вариант дополнительной проходки промежуточных подэтажей (с отметками 477 м и 464 м) с минимальной шириной целика между подэтажами 3,5–4 м.

Результаты объемного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) показали, что под влиянием очистной выемки происходит формирование сложного техногенного поля напряжений, характеризующегося наличием зон концентрации напряжений преимущественно в двух верхних подэтажах (в области, граничащей с ранее выработанным пространством) и в прилегающих к ним участкам междуканальных целиков. Рост нормальных напряжений $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$

(среднего давления) происходит прямо пропорционально увеличению длины выработанного пространства L , достигая максимума (до 100 МПа и более) при полной отработке блока. В формирующемся вокруг очистного пространства техногенном поле напряжений выявлена протяженная область повышенных напряжений в лежачем боку рудного тела.

Ситуация осложняется при полной отработке соседнего очистного блока: в этом случае напряжения в целиках увеличиваются на 25–30 % (рис. 1).

При оценке удароопасности краевых частей горного массива, целиков и других элементов систем разработки наиболее широко применяются критерии хрупкого разрушения горных пород, основанные на способности пород разрушаться без заметной пластической деформации [5–6]. Рудные междуканальные целики, испытывающие предельные нагрузки, оценивались по критерию, основанному на теории максимальных нормальных сжимающих напряжений, в которой последние сопоставляются с прочностью на сжатие с учетом нарушенно-

сти массива: $\sigma_{\max} \leq K_c \cdot \sigma_{сж}$, где σ_{\max} – максимальные напряжения, дейст-

вующие в массиве, МПа; K_c – коэффициент структурного ослабления -

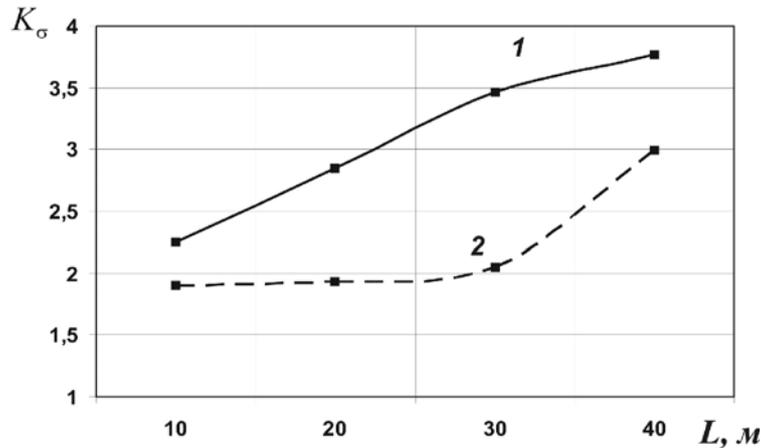


Рис. 2. Изменение K_σ в массиве верхнего подэтажа (1) и в соответствующем участке междукамерного целика (2) в зависимости от длины выработанного пространства L (при $t = 3$ м; $\beta = 40^\circ$)

(для руд Южного месторождения $K_c = 0,7$; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа.

Установлено, что на заключительных стадиях отработки блока (при длине выработанного пространства $L = 30$ м и более) целики теряют устойчивость и возникает высокая вероятность их разрушения в динамической форме.

По результатам моделирования были выявлены представляющие научный и практический интерес закономерности изменения техногенного поля напряжений в конструктивных элементах применяемой системы разработки в условиях высокой изменчивости параметров и элементов залегания рудных тел.

Изменение мощности рудного тела с 3 до 0,75 м приводит к снижению напряжений в верхних целиках на 15–20 %. Значительно большее влияние на уровень напряжений оказывают изменение угла падения рудных

тел β и увеличение длины выработанного пространства L .

Так по мере увеличения длины выработанного пространства уровень нормальных и касательных напряжений в охранных целиках шириной 3 м приближается к пределу прочности пород на сжатие, что свидетельствует об их высокой удароопасности.

Изменение коэффициента концентрации нормальных напряжений $K_\sigma = \sigma_{ср} / \sigma_{исх}$ в зависимости от длины выработанного пространства L иллюстрируют графики на рис. 2.

Важное значение имеет количественная оценка совокупности влияния рассматриваемых факторов на исходное напряженное состояние. По результатам регрессионного анализа были получены зависимости, с удовлетворительной точностью (точность аппроксимации составляет не менее 83 %) связывающие длину выработанного пространства и мощность

жилы с величиной коэффициента концентрации нормальных напряжений в различных элементах системы разработки при постоянном угле залегания рудного тела.

Для междокамерного рудного целика верхнего подэтажа эта зависимость имеет вид:

$$K_{\sigma} = -0,033 + 1,617m - 0,339m^2 + 0,063L - 3,68 \cdot 10^{-4}L^2,$$

где K_{σ} – коэффициент концентрации нормальных напряжений; m – мощность рудного тела, м; L – длина выработанного пространства, м.

При этом максимальная концентрация напряжений в междокамерном целике наблюдается при мощности жилы в 2,5 м, и увеличивается по мере отработки блока.

При обосновании мероприятий по повышению ударобезопасности предложенной системы разработки установлено, что увеличение ширины охранных целиков до 4 м, несколько снижает их напряженность (в 1,1 раза) и одновременно повышает несущую способность, но полностью не исключает возможность разрушения данных конструктивных элементов в динамической форме. Кроме того, реализация этого мероприятия увеличивает потери полезного ископаемого. Также был промоделирован вариант шелевой разгрузки, по результатам которого было зафиксировано снижение уровня напряжений на 14 %, что свидетельствует о целесообразности применения данного профилактического мероприятия.

Николаевское месторождение представлено группой скарновосульфидных залежей сложной формы, приуроченных к границе несогласия между двумя структурными этажами и залегающих на большой глубине от

поверхности. Залежи локализуются на контакте верхнетриасовых известняков с несогласно перекрывающимися их верхнемеловыми туфами липаритов, в которых залегают андезиты и в которых сформировались глыбовые и жильные рудные тела.

Район месторождения характеризуется блочным строением массива, главными элементами которого являются крутопадающие Субширотный разлом и Северо-Западная тектоническая зона, разделяющие поле месторождения на три основных структурных блока: северный, центральный и западный. В пределах месторождения выделяются также протяженные крутопадающие разрывные пострудные нарушения субмеридионального простирания.

Первоначально месторождение разрабатывалось камерно-целиковой системой с твердеющей закладкой, но результаты отработки показали, что данная система разработки выполняется неудовлетворительно, и в последние годы получен положительный опыт применения камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли [7]. Рудную залежь разбивают на блоки, содержащие камеру и целик; в первую очередь извлекают запасы камеры, а затем обрушают целик и осуществляют выпуск руды под защитой породной консоли; завершив выемку запасов, производят принудительное обрушение пород кровли до проектной высоты и приступают к отработке готового к выемке смежного блока.

По результатам анализа геомеханической и горнотехнической обстановки установлено, что потенциальную удароопасность может в перспективе представлять неотработанный участок рудной залежи «Харьковская» в этаже –267...–275 м, район

которой характеризуется повышенной сейсмоакустической активностью

и случаями динамических проявлений горного давления [8].

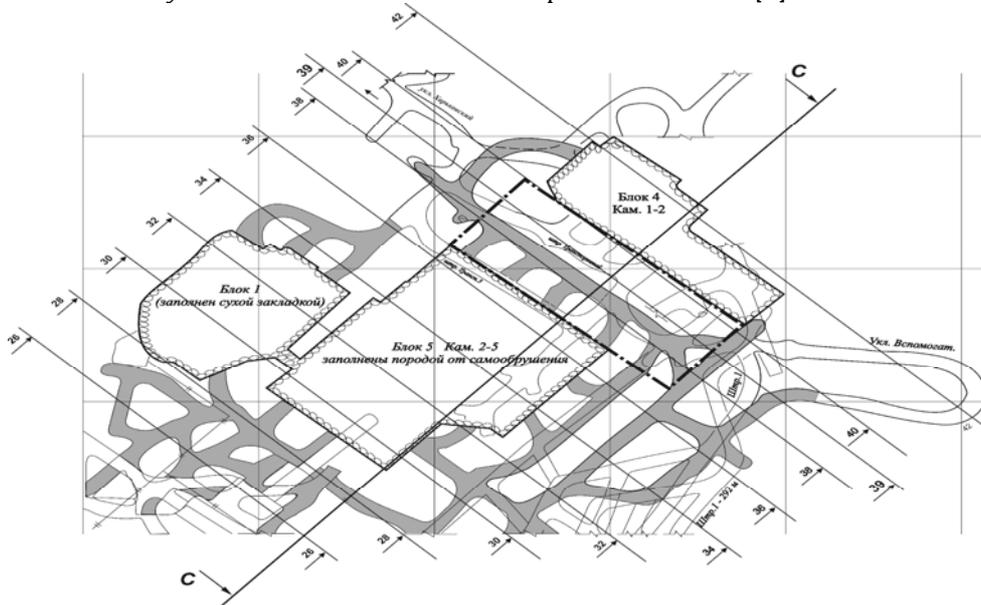


Рис. 3. Совмещенный план горизонта -267 м и -275 м Николаевского рудника:

Данный участок расположен между профильными линиями 37 и 40, и сопрягается с северо-западного и юго-восточного направления с ранее отработанными камерами 2–5 Блока 5 и камерами 1–2 Блока 4 соответственно (рис. 3).

Для оценки техногенного поля напряжений на данном участке рудничного поля наряду с инструментальными методами применялось математическое моделирование НДС массива горных пород методом конечных элементов.

В качестве опорных были взяты два поперечных (37, 39) и продольный разрез С. Максимальные сжимающие напряжения, действующие на границах поперечных разрезов (37, 39), превышают гравитационную составляющую в 1,5 раза, а на границах продольного разреза С – в 2,5 и возрастают по мере увеличения глубины горных работ. Обобщенная расчетная схема для моделирования НДС отра-

батываемого участка Николаевского месторождения приведена на рис. 4.

С помощью математического моделирования МКЭ исследовали изменение уровня напряжений в отдельных точках массива по мере увеличения выработанного пространства в процессе отработки блока (см. рис. 4). Результаты расчетов представлялись в виде изолиний средних нормальных напряжений $\sigma_{ср} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ и интенсивности касательных напряжений $\tau_{инт} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$.

Анализ результатов моделирования показал следующее. До начала отработки рудного массива напряжения сжатия равномерно распределялись вокруг существующих выработок, при этом значения $\sigma_{ср}$ не превышали 50 МПа.

По мере отработки верхней части запасов происходит равномерный рост касательных и нормальных напряжений краевых частей массива.

На начальных стадиях отработки напряжения концентрируются преимущественно в окрестностях закладочно-

го штрека и величина $\sigma_{ср}$ и $\tau_{инт}$ составляет 60 и 40 МПа соответственно.

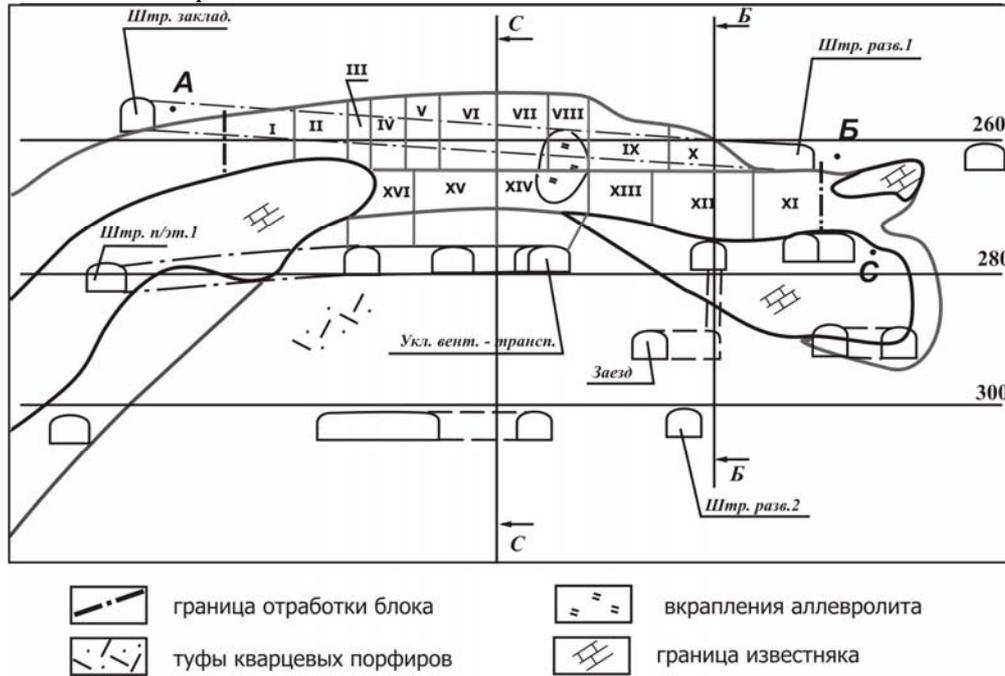


Рис. 4. Обобщенная расчетная схема для моделирования НДС отработываемого участка Николаевского месторождения: I-XI – очередность отработки рудной залежи; А, Б и С – характерные точки в массиве

После отработки большей части запасов верхней части блока (с V по IX стадии) происходит перераспределение напряжений в участок массива, где расположен вентиляционно-транспортный уклон, и величина их резко возрастает (до 102 МПа) и достигает критической величины близкой к пределу прочности вмещающих горных пород.

После полной отработки верхней части блока в область повышенных напряжений попадают два крайних штрека (закладочный и разведочный). Уровень напряжений в них превышает первоначальный соответственно в 3 и 3,5 раза (рис. 5 и 6) и достигает 140 МПа, что превышает предел прочности на сжатие вмещающих пород. С пере-

ходом на горизонт -275 м (XI и последующие стадии) дальнейшего роста нормальных и касательных напряжений не наблюдается.

В процессе исследований установлено, что на заключительных стадиях отработки блока (после IX стадии) отдельные участки массива рудной залежи «Харьковская» могут представлять потенциальную удароопасность, что необходимо учитывать при ведении горных работ.

Здесь необходимо организовать непрерывный геомеханический мониторинг состояния массива, в том числе с использованием автоматизированных систем контроля, а в случае определения категории

«Опасно» применять профилактические мероприятия по предотвращению динамических проявлений горного давления [9].

В целом результаты выполненных исследований дают основания для следующих выводов:

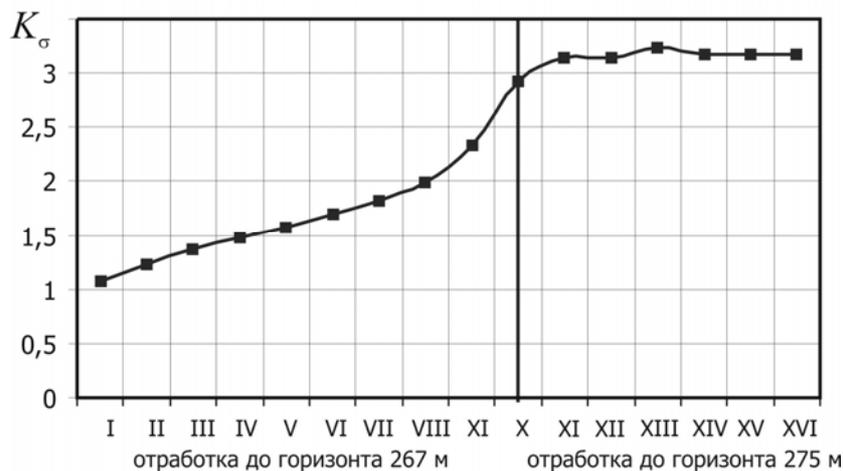


Рис. 5. Изменение K_σ в окрестностях закладочного штрека (точка А) на различных стадиях отработки блока

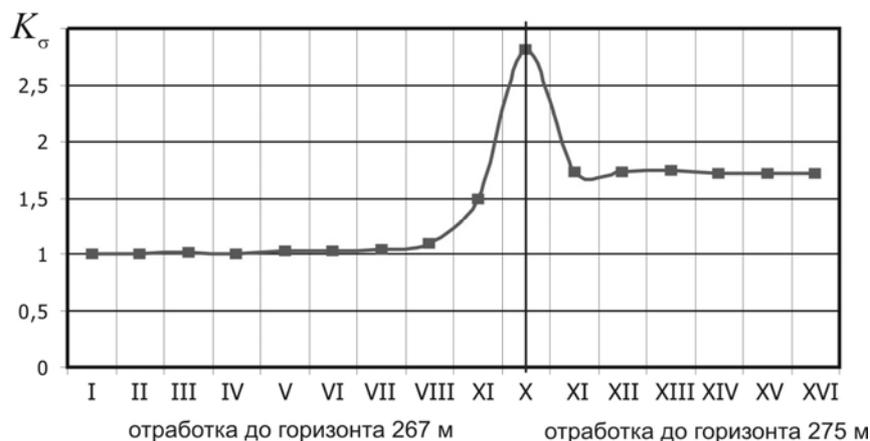


Рис. 6. Изменение K_σ в районе разведочного штрека (точка Б) на различных стадиях отработки блока

1. Предложенные для условий глубоких горизонтов Южного месторождения технология и порядок отработки запасов, предусматривающие комбинированный вариант системы разработки: подэтажными штреками с торцовым выпуском (для отработки верхней части блока) и с выпуском

руды через лучки (в нижней части), приводят к значительному перераспределению напряжений в зоне влияния очистной выемки и их опасной концентрации в отдельных участках массива горных пород. При этом наиболее высокая концентрация напряжений отмечена в формирующих-

ся межштрековых целиках и в рудном массиве подэтажей, где среднее давление и интенсивность касательных напряжений на последних стадиях отработки очистного блока достигает 100 МПа и более, что указывает на потенциальную удароопасность этих участков массива.

2. Отработка очистного блока на Николаевском месторождении с применением камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли приводит к формированию сложного техногенного поля напряжений и перераспределению опасных концентраций напряжений в различные области по мере увеличения очистного пространства. При полной от-

работки блока до горизонта – 267 м величина напряжений превышает предел прочности на сжатие слагающих пород, что свидетельствует о потенциальной удароопасности данного участка массива.

3. Для снижения удароопасности при отработке удароопасных участков месторождений может быть рекомендован комплекс мероприятий, предусматривающий изменение формы поперечного сечения выработок в сочетании с шелевой разгрузкой наиболее напряженных краевых частей массива и целиков, а также непрерывный геомеханический мониторинг массива горных пород автоматизированными системами контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987.

2. *Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов:* Справочное пособие / И.М. Петухов, А.М. Линьков, В.С. Сидоров и др. – М.: Недра, 1992.

3. *Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока* / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, А.А. Еременко и др. – Новосибирск: Наука, СИФ, 1992. – 177 с.

4. *Рассказов И.Ю.* Численное моделирование современного поля тектонических напряжений в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов // Тихоокеанская геология. 2006. № 5. Том 25. С. 104–114.

5. *Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Филиппов П.А.* Устойчивость горных выработок при системах подэтажного обрушения // ФТПРПИ. – 2008. – № 1.

6. *Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А.*

Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005 г.

7. *Методы контроля и управления горным давлением на рудниках ОАО «ГМК «Дальполиметалл»* / И.Ю. Рассказов, Г.А. Курсакин, А.М. Фрейдин, В.Н. Черноморцев, С.П. Осадчий // Горный журнал. 2006. № 4. С. 35–38.

8. *Результаты геоакустического контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока* / И.Ю. Рассказов, П.А. Аникин, Д.С. Мигунов, А.Ю. Искра // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Мир горной книги», 2008. № 7. С. 104–111.

9. *Указания по безопасному ведению горных работ на Николаевском и Южном месторождениях (ОАО «ГМК «Дальполиметалл»), опасных по горным ударам* / И.Ю. Рассказов, Г.А. Курсакин, В.Н. Черноморцев, С.П. Осадчий и др. // Указания по ведению горных работ. – Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2008. 64 с. **ПДАБ**

Коротко об авторах

Рассказов И.Ю. – доктор технических наук, директор Института горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, adm@igd.khv.ru

Потапчук М.И. – научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН

Осадчий С.П. – главный горняк ОАО «ГМК» Дальполиметалл»

Потапчук Г.М. – научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН

