© А.А. Козырев, И.Э. Семенова, И.М. Аветисян, 2015

УДК 622.831

А.А. Козырев, И.Э. Семенова, И.М. Аветисян

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ СТЫКОВОЧНЫХ ЗОН НА ЮКСПОРСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ[*]

Рассмотрены варианты отработки запасов горизонтов +320 м и +250 м удароопасного Юкспорского месторождения апатит-нефелиновых руд с учетом фактического состояния горных работ. Уточнены параметры стыковочных секций по результатам прогнозной оценки их напряженного состояния. Обоснована технология работ, снижающая геодинамические риски при выемке запасов. Доказана необходимость создания разгрузочной зоны в висячем боку рудной залежи при достижении критических размеров блока-целика на каждом подэтаже с опережением вышележащего подэтажа по отношению к нижележащему. Определены предельные размеры стыковочной секции и ее оптимальное местоположение на подэтажах. Выполнены прогнозные расчеты категорий состояния выработок на подэтажах и откаточных горизонтах. Предложены способы поддержания горных выработок и порядок контроля состояния массива при отработке стыковочной секции. Разработаны профилактические мероприятия для минимальных и оптимальных по геомеханическим параметрам отставаний. Подготовлены специальные технические регламенты отработки блока-целика гор.+320 м и блока-целика гор.+250 м.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива пород Юкспорского месторождения выполнено методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса SigmaGT, разработанного в Горном институте КНЦ РАН.

Ключевые слова: геомеханика, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, подземная разработка месторождений полезных ископаемых, стыковочная секция.

В последние годы наращивание объемов добываемой руды на месторождениях АО «Апатит» происходит за счет увеличения доли подземных горных работ. Наибольшая нагрузка в этом плане ложится на Объединенный Кировский рудник (ОКР), обеспечивающий основную долю добычи полезных ископаемых. Производительность рудника в ближайшие годы планируется увеличить до 14 млн т руды в год. Успешная реализация поставленной перед ОКР задачи во многом зависит от оптимального развития работ на горизонтах +320 м и +250 м Юкспорского месторождения.

Юкспорское месторождение является одним из апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива и расположено в его южной части. Рудная залежь месторождения пластообразная. По особенностям геологического строения она разделена на участки Юкспор (северо-западный) и Гакман (юго-восточный). Залежь прослежена до абсолютных отметок -500 ÷ -600 м, где происходит ее выклинивание. Падение залежи

[*] Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751.

на восток – северо-восток под углом 30÷40° до отметок 0÷100 м, с увеличением угла на больших глубинах – до 40÷50°.

Как и для других месторождений Хибин, напряженное состояние массива Юкспорского месторождения относится к гравитационно-тектоническому типу, причем горизонтальные напряжения в несколько раз превышают вертикальные [1]. По данным измерений напряжений методом разгрузки максимальные сжимающие напряжения на удалении от очистных пространств действуют на горизонтах +320 – +250 м под небольшим углом или диагонально к простиранию рудного тела и варьируются в пределах 30–40 МПа. Наблюдается рост максимальных сжимающих напряжений с глубиной, так по данным измерений 2011 г. на горизонте +172 м средний уровень σ_{max} составил 46 МПа, азимут вектора σ_{max} $\alpha \approx 45°$, угол с горизонтом составляет 20°. На более высоких отметках отклонение σ_{max} от горизонтальной плоскости меняется от 2° до 8°.

В настоящее время работы на месторождении в основном ведутся на двух горизонтах: +320 м и +250 м. Запасы горизонта +410 м практически отработаны. Выемка полезного ископаемого на горизонте +320 м развивается встречными фронтами, которые в недалеком будущем окажутся в зоне взаимного влияния. На гор. +250 м работы ведутся одним фронтом в юго-восточном направлении. Для наращивания объемов подземной добычи руды на гор. +250 м запланирована вторая разрезка, которую предполагается провести по 15 разрезу.

Таким образом, на определенном этапе ведения горных работ на данных горизонтах будут образованы стыковочные зоны (блоки-целики), отработка запасов которых должна вестись по специально разработанному регламенту, так как Юкспорское месторождение отнесено к опасным по горным ударам [2].

Горным институтом КНЦ РАН были разработаны два регламента на отработку запасов стыковочной зоны гор. +320 м и гор. +250 м. Целью разработанных регламентов являлось обоснование порядка отработки стыковочных зон гор. +320 м и гор. +250 м Юкспорского месторождения с учетом действия в массиве пород высоких тектонических напряжений. После достижения критических размеров стыковочных зон горные работы должны вестись по данным регламентам [3].

В качестве основной идеи, которая позволила бы обеспечить максимальную производительность горизонтов, наряду с выводом большей части массива пород из удароопасного состояния, принято создание по висячему боку протяженной разгрузочной зоны. Для условий Юкспорского месторождения создание подобной зоны приводит к значительному снижению напряжений (в 1,5–2,0 раза) при отработке основных запасов горизонтов и развитию активного фронта очистных работ, обеспечивающего высокую интенсивность отработки рудной залежи [4].

Параметры ведения горных работ выбраны с учетом фактического состояния горных работ и напряженно-деформированного состояния (НДС) на месторождении, а также прогнозного перераспределения напряжений на горизонтах по мере их отработки. Прогнозные расчеты НДС проведены методом конечных элементов в объемной постановке, с использованием специально разработанной геомеханической модели месторождения в среде лицензионного программного обеспечения SigmaGT [5].

Размеры области моделирования в плане составляют 1800×1300 м. По вертикальной оси модель ограничена рельефом дневной поверхности и дном на отметке -100 м. Количество

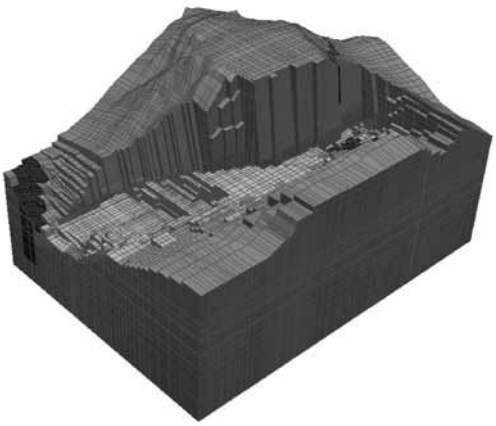

Рис. 1. Трехмерная конечно-элементная модель Юкспорского месторождения

элементов в типовом вертикальном сечении 1850, в модели – 162 800. Трехмерный вид конечноэлементной модели представлен на рис. 1.

При развитии горных работ встречными фронтами при определенном расстоянии между ними происходит существенное увеличение напряжений за счет взаимного наложения зон концентрации напряжений. Именно при таких параметрах участок массива между очистными пространствами в условиях действия высоких тектонических напряжений становится блоком-целиком и для его отработки необходима разработка мероприятий по предотвращению вредных проявлений горного давления.

Под началом взаимного влияния двух очистных пространств при модельных исследованиях понимается 5–10% увеличение концентрации напряжений в целике между ними по сравнению с начальным уровнем, что соответствует точности определений параметров напряженного состояния массива существующими методами. Определение размеров стыковочной зоны выполнено путем последовательных расчетов при реализации вероятной схемы отбойки запасов в центральной части горизонтов.

При анализе результатов численного моделирования НДС массива пород в окрестности Юкспорского месторождения определены предельные размеры стыковочной зоны (блока-целика): 285 м для горизонта +320 м и 300 м для горизонта +250 м. Начиная с таких расстояний между фронтами горные работы в блоках должны вестись в соответствии с разработанными регламентами.

С помощью разработанной численной модели Юкспорского месторождения были рассчитаны варианты последовательного развития горных работ при отработке запасов стыковочной зоны на горизонтах +320 м и +250 м с формированием отрезки по висячему боку рудной залежи. В каждом из вариантов промоделировано не только формирование разгрузочной зоны, но и развитие горных работ юго-восточного и северо-западного фронтов на соответствующий период времени.

Рассмотрим основные закономерности перераспределения полей напряжений в зоне стыковки горных работ горизонта +320 м по мере развития очистной выемки. В качестве примера оценим перераспределение максимальной компоненты главных напряжений σ_{max} на 4 буро-доставочном гор. +396 – +402 м (4 подэтаж гор. +320 м) по мере отработки запасов стыковочной зоны между сближающимися фронтами горных работ (рис. 2).

Как видно, современное напряженное состояние на подэтаже характеризуется высоким уровнем максимальных сжимающих напряжений, которые варьируют в пределах 20÷80 МПа (рис. 2, *а*). Концентрация σ_{max} наблюдается под границей отбойки гор. +410 м в висячем боку рудной залежи, а также в окрестности юго-восточного фронта горных работ – с уровнем напряжений до 80 МПа. Направление действия σ_{max} диагональное

по отношению к элементам залегания рудного тела. По мере сближения фронтов угол σ_{max} с магистральным направлением увеличивается.

При достижении минимальных размеров стыковочной секции (рис. 2, *б*) уровень напряжений в ней достигает 70 МПа, при этом на нижележащем подэтаже под секцией средний уровень значений $\sigma_{max} \approx 50$ МПа.

После отбойки стыковочной секции (рис. 2, *в*) на горизонте образуется значительная область со сниженными в 1,5–2 раза значениями напряжений. При этом в стыковочной секции нижележащего горизонта +374 – +379 $\sigma_{max} \approx 70$ МПа. У защищенных опережающей отбойкой фронтов образуются области пониженных значений напряжений.

То есть сразу после отрезки по висячему боку на текущем и вышележащих подэтажах в массиве блока-целика происходит перераспределе-

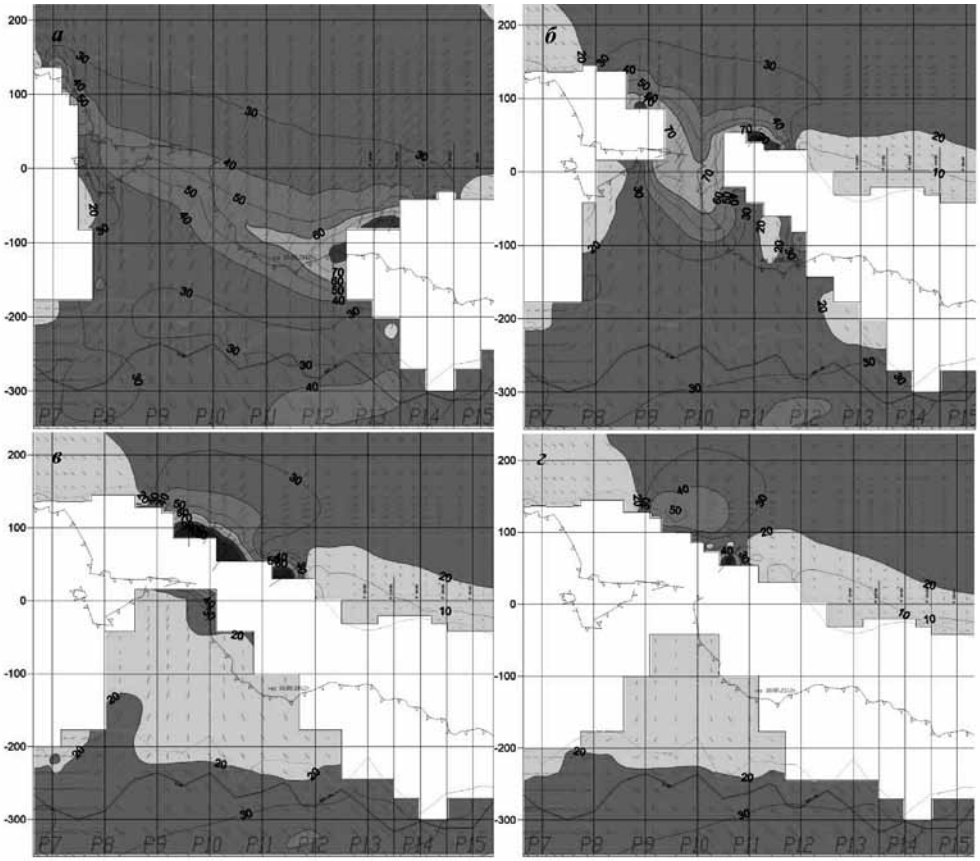

Рис. 2. Перераспределение максимальной компоненты главных напряжений σ_{max} на 4 буро-доставочном гор. +396 – +402 м (4 подэтаж гор. +320 м) по мере отработки запасов стыковочной зоны между сближающимися фронтами горных работ: а) Фактическое состояние горных работ на сентябрь 2013 г.; б) Сближение фронтов до образования стыковочной секции; в) Отбойка стыковочной секции на подэтаже гор. +396 – +402 м. Образование стыковочной секции на подэтаже гор. +374 – +379 м (3 буро-доставочный горизонт); г) Отбойка стыковочной секции на подэтаже гор. +374 – +379 м. Образование стыковочной секции на подэтаже гор. 354 – +364 м (2 буро-доставочный горизонт)

ние напряжений с резким снижением уровня сжимающих напряжений σ_{max} (рис. 2, *в*, *г*) до величины ≈20 МПа. Следует отметить, что уровень напряжений в самой стыковочной секции на нижних подэтажах несколько выше, до 80 МПа, при несколько меньшей по площади зоне концентрации напряжений.

На откаточном горизонте уровень напряжений постепенно растет и под сформировавшейся отрезкой образуется протяженная зона концентрации σ_{max} с абсолютными величина более 60 МПа.

Рассмотрим основные закономерности перераспределения полей напряжений в зоне стыковки горных работ горизонта +250 м по мере развития очистной выемки. В качестве примера оценим перераспределение максимальной компоненты главных напряжений σ_{max} на 2 буро-доставочном гор. +285 м (2 подэтаж гор. +250 м) по мере отработки запасов стыковочной зоны между сближающимися фронтами горных работ (рис. 3).

Современное напряженное состояние на подэтаже характеризуется средним уровнем максимальных сжимающих напряжений, со значениями в породах рудного тела 30÷40 МПа. В зонах концентрации напряжений – до 45 МПа. Причем зона концентра-

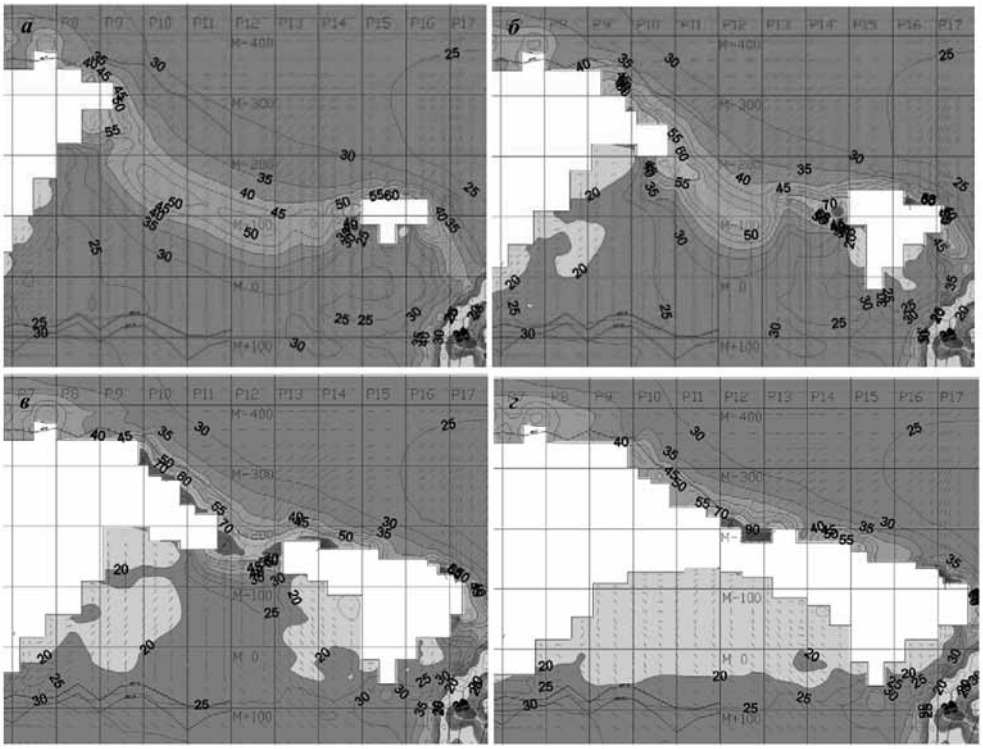

Рис. 3. Перераспределение максимальной компоненты главных напряжений σ_{max} на 2 буро-доставочном гор. +285 м (2 подэтаж гор. +250 м) по мере отработки запасов стыковочной зоны между сближающимися фронтами горных работ: а) Разрезка на гор. +285 м; б) Разрезка на гор. +260 м (1 подэтаж гор. +250 м). Образование стыковочной секции на гор. +310 м (3 подэтаж гор. +250 м); в) Отбойка стыковочной секции на подэтаже +310 м. Образование стыковочной секции на подэтаже + 285 м; г) Отбойка стыковочной секции на подэтаже +285 м. Образование стыковочной секции на подэтаже + 260 м

ции расположена практически по центру рудной залежи, что связано с пологим контактом рудного тела в данных высотных отметках.

На откаточном горизонте +250 м наиболее высокий уровень σ_{max} фиксируется под фронтом очистных работ гор. +260 м, абсолютные величины напряжений достигают 100 МПа.

При организации второй разрезки и развитии юго-восточного фронта работ (рис. 3, *а*) происходит существенное увеличение напряжений в породах блока-целика, максимальная компонента сжимающих напряжений на гор. +285 м достигает 60 МПа. На откаточном же горизонте с развитием опережения по висячему боку на нижних подэтажах ситуация улучшается – в зоне концентрации напряжений не более 50 МПа. По мере сближения фронтов угол σ_{max} с магистральным направлением увеличивается (рис. 3, *б*).

Наибольшие значения напряжений фиксируются в породах стыковочной секции. Так, при достижении минимальных размеров стыковочной секции на гор. +285 м (рис. 3, *в*) уровень напряжений в ней достигает 90 МПа. При этом вследствие отбойки стыковочной секции на верхнем подэтаже (гор. +310 м) на гор. +285 м появляется область со сниженными в 1,5 – 2 раза значениями напряжений.

При отбойке стыковочной секции на подэтаже гор. +285 м и при достижении критических размеров стыковочной секции на нижнем подэтаже гор. +260 м (рис. 3, *г*) зона ведения горных работ на гор. +285 м и гор. +310 м разгружается. При этом наблюдается постепенный рост напряжений на откаточном горизонте в висячем боку рудной залежи под опережающей отбойкой гор. +260 м с величинами до 75 МПа.

Таким образом, выявлена эффективность региональной разгрузки массива пород стыковочной зоны для условий горизонтов +320 м и +250 м при формировании отрезки в висячем боку рудной залежи. Основными участками концентрации напряжений на всех подэтажах является массив пород стыковочных секций, который находится в объемном напряженном состоянии, то есть все три главных напряжения велики настолько, что пренебрегать ими в определении устойчивых параметров секций недопустимо.

С целью уточнения параметров стыковочных секций на гор. +320 м и +250 м было рассмотрено несколько возможных их положений: для гор. +320 м – в районе разрезов 9÷10, 10÷11, 11÷12; для гор. +250 м – в районе разрезов 12÷13, 13÷14.

Для каждого из положений был просчитан спектр вариантов с последовательной отбойкой стыковочной секции и развитием горных работ на подэтажах. От расположения стыковочной секции зависит возможная протяженность разгрузочных зон до нее от сближающихся фронтов горных работ и эффект разгрузки защищенных участков массива до полной отрезки по висячему боку. Из этих соображений, оптимальное положение стыковочной секции – на равном удалении от юго-восточного и северо-западного фронтов горных работ. Однако направление действия σ_{max} таково, что снижение напряжений в большей мере достигается за счет опережающего развития юго-восточной части разгрузочной зоны. Существенных изменений напряженно-деформированного состояния при сдвижении секции не происходит, различия максимальных напряжений в областях их концентрации у сближающихся фронтов разгрузочной зоны не превышают 5–10%. Области, в которых фиксируется снижение напряжений сжатия, имеют на подэтажах примерно равную площадь.

Таким образом, в результате исследования НДС массива Юкспорского

месторождения определено оптимальное положение стыковочных секций: для гор. +320 м – в интервале разрезов 9+18÷12; для гор. +250 м – в интервале разрезов 12÷14.

Для определения минимальных размеров стыковочной секции было проведено численное моделирование НДС при размерах секции 70 м, 90 м, 110 м. Полученные прогнозные величины главных компонент напряжений вводили в уравнение предельного состояния пород стыковочной секции:

$$k_з \cdot (\sigma_{max} + \sigma_{ср}) = k_{осл} \cdot \sigma_с + k \cdot \sigma_{min}, \quad (1)$$

где $\sigma_с$ – прочность породы при одноосном сжатии; σ_{max}, $\sigma_{ср}$, σ_{min} – соответственно максимальное, среднее и минимальное сжимающие напряжения, действующие в стыковочной секции; k – коэффициент пропорциональности (для апатит-нефелиновых руд k = 5); $k_{осл}$ – коэффициент структурного ослабления, $k_{осл}$ = 0,8 для I категории по интенсивности трещиноватости; $k_з$ – коэффициент запаса, $k_з$ = 2 для секции, существующей не более одного года.

Для левой и правой части уравнения были построены линии зависимости от размера секции (соответственно *1* и *2* на рис. 4). Точка их пересечения соответствует минимально возможной ширине стыковочной секции: 81 м для гор. +320 м и 86 м для гор. +250 м.

Так как участки неотбитого массива, примыкающие к очистному пространству или к обрушенному массиву, из-за отсутствия со стороны отбитого или обрушенного массива нормальных напряжений достаточной величины будут формироваться с нарушением сплошности по существующим плоскостям ослаблений, то необходимо увеличение ширины секции на 5 м с каждой стороны. То есть окончательная ширина стыковочной секции должна быть не менее 90 м для гор. +320 м и не менее 95 м для гор. +250 м.

На ширину стыковочной секции будет влиять сложная гипсометрия верхнего контакта рудного тела. На гор. +320 м Юкспорской залежи в разрезах 9–16 угол падения контакта варьируется в пределах 18÷36°, на гор. +250 м – в пределах 22÷35°, причем на нижних подэтажах в целом наблюдается укручение верхнего контакта рудного тела. Образование разгрузочной зоны предпочтительно проводить двумя буро-доставочными штреками. Их местоположение должно определяться следующими принципами:

- максимальная длина скважины не должна превышать 35÷40 м;
- должна быть обеспечена обязательная сбойка с отбитым массивом на вышележащем горизонте.

Соответственно ширина разгрузочных зон и стыковочных секций на

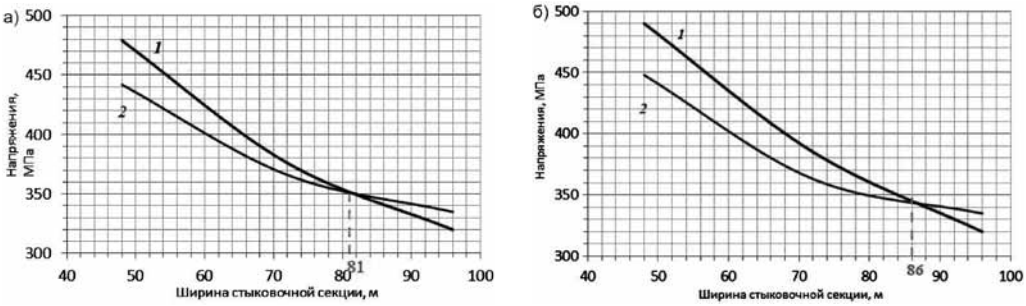

Рис. 4. Графическое определение ширины стыковочной секции для уравнения предельного состояния пород: а) для гор. +320 м, б) для гор. +250 м; 1 – левая часть уравнения, 2 – правая часть уравнения

подэтажах будет варьировать от 40 м до 100 м.

Наиболее предпочтительной является такая организация работ, когда создание разгрузочной зоны ведется одновременно на всех подэтажах с опережением вышележащего подэтажа по отношению к нижележащему. Чем больше глубина заглубления разгрузочной зоны, тем заметнее эффект разгрузки в породах рудного тела к лежачему боку от нее. Возможно также взрывание стыковочных секций на каждом подэтаже отдельно по мере достижения предельного положения. Очень важным фактором при стыковке разгрузочной зоны является время, так как при прогнозируемом уровне напряжений, составляющем около $0{,}5\sigma_c$ возможны динамические проявления горного давления и разрушения в выработках. Поэтому объем стыковочной секции на подэтаже не должен быть более объема, который можно взорвать одним взрывом.

Выполнены прогнозные расчеты категорий состояния выработок на подэтажах и откаточных горизонтах. Предложены способы поддержания горных выработок и порядок контроля состояния массива при отработке стыковочной секции. Разработаны профилактические мероприятия для минимальных и оптимальных по геомеханическим параметрам отставаний.

Таким образом, в результате выполненных исследований:

• с учетом данных прогнозного моделирования НДС определены предельные размеры стыковочной зоны (блока-целика) – 285 м для горизонта +320 м и 300 м для горизонта +250 м;

• доказана необходимость создания разгрузочной зоны в висячем боку рудной залежи при достижении критических размеров блока-целика на каждом подэтаже с опережением вышележащего подэтажа по отношению к нижележащему;

• определено оптимальное местоположение стыковочной секции на подэтажах:

– для гор. +320 м – в пределах разрезов Р9+18 ÷ Р12;

– для гор. +250 м – в пределах разрезов Р12 ÷ Р14.

• обоснованы предельные размеры стыковочной секции:

– для гор. +320 м – 90 м по простиранию и не менее 40 м вкрест простирания;

– для гор. +250 м – 95 м по простиранию и не менее 40 м вкрест простирания.

• отбойка стыковочных секций должна осуществляться одним взрывом на подэтаже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А.* Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.

2. *Инструкция* по безопасному ведению горных пород на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06–329–99). – М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 66 с.

3. *Указания* по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). – Апатиты-Кировск, 2010. – 117 с.

4. *Мельников Н.Н., Козырев А.А., Демидов Ю.В., Енютин А.Н., Мальцев В.А., Свинин В.С.* Геомеханическое обоснование эффективной технологии отработки мощных месторождений на больших глубинах / Горное дело в Арктике. Труды 8-го международного симпозиума. – Апатиты–СПб., 2005. С. 26–34.

5. *Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А.* Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на рудниках ОАО «Апатит» / Геодинамика и напряженное состояние недр земли: сборник докладов международной конференции – Новосибирск, 2008. – С. 272–278. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора, *e*-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,
Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, *e*-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,
Аветисян Иван Михайлович – кандидат технических наук, научный сотрудник, *e*-mail: ivanavetisyan@yandex.ru,
Горный институт Кольского научного центра РАН.

UDC 622.831

GEOMECHANICAL FOUNDATION OF SAFE JOINING AREAS MINING ON YUKSPOR DEPOSIT

Kozyrev A.A.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director, *e*-mail kozar@goi.kolasc.net.ru,
Semenova I.E.[1], Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, *e*-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,
Avetisian I.M.[1], Candidate of Technical Sciences, Researcher, *e*-mail: ivanavetisyan@yandex.ru,
[1] Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

The variants of hazardous on rock bursts apatite-nepheline Yukspor deposit mining on horizons +320 m and +250 m with taking into account the actual state of mining are considered in the paper. The parameters of joining sections are specified by the results of their stress state predictive estimation. The technology which reduces geodynamic risks during mining is substantiated. The requirement of stress relief zone creation in ore body hanging wall on each sublevel when block-pillar reaches its critical sizes with advancing of overlying sublevel relative to underlying one is proved. The minimum sizes of joining section and its optimal situation on sublevels are determined. The predictive estimations of workings condition categories on sublevels and haulage horizons are carried out. The techniques of workings supporting and the order of rock mass stress state control while joining section mining are suggested. The preventive arrangements for minimal and optimal by geomechanical parameters laggings are developed. The special technical regulations of block-pillar mining on horizons +320 m and +250 m are prepared.

The Yukspor deposit rock mass stress-strain state numerical modeling is carried out by finite element method in three-dimensional statement with using the SigmaGT software, which was developed in Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.

Key words: geomechanics, stress-strain state, mathematical modeling, underground mining, joining section.

ACKNOWLEDGEMENTS

The studies have been supported by the Russian Science Foundation, priority research program «Basic and exploratory research by individual scientific teams», grant no. 14-17-00751.

REFERENCES

1. Turchaninov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I., Kozyrev A.A. *Tektonicheskie napryazheniya v zemnoi kore i ustoichivost' gornykh vyrabotok* (Tectonic stresses in the Earth crust and stability of underground excavations), Leningrad, Nauka, 1978, 256 p.

2. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh porod na rudnikakh i nerudnykh mestorozhdeniyakh, ob"ektakh stroitel'stva podzemnykh sooruzhenii, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (RD 06-329-99)* (Guidelines on safe underground metal and nonmetal mining and construction under rockburst hazard conditions (RD 06-329-99)), Moscow, GP NTTs po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii, 2000, 66 p.

3. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Khibinskie apatit-nefelinovye mestorozhdeniya)* (Instructions of safe mining at rockburst-hazardous deposits (Khibiny apatite–nepheline ore bodies)), Apatity–Kirovsk, 2010, 117 p.

4. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A., Demidov Yu.V., Enyutin A.N., Mal'tsev V.A., Svinin V.S. *Gornoe delo v Arktike. Trudy 8-go mezhdunarodnogo simpoziuma* (Mining in Arctic. VIII International Symposium Proceedings), Apatity–Saint-Petersburg, 2005, pp. 26–34.

5. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Shestov A.A. *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr zemli: sbornik dokladov mezhdunarodnoi konferentsii* (Geodynamics and stress state of the Earth's interior: International conference proceedings), Novosibirsk, 2008, pp. 272–278.