

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 539.3.01:622.834

### ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ РАЗРЕЗНЫХ СЛОЕВ В НАДРАБОТАННОМ МАССИВЕ РУДНИКА “ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ”

**В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vbar@misd.nsc.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

С использованием подхода к оценке и прогнозу устойчивости конструктивных элементов систем разработки, основанного на применении методов численного моделирования НДС массива горных пород в комплексе с результатами натуральных наблюдений за деформированием приконтурного массива выработок, выполнен геомеханический анализ вариантов отработки разрезных слоев в надработанном массиве для условий рудника “Интернациональный” АК “АЛРОСА”. Рассмотрены различные технологические схемы очистных работ в слое и определен оптимальный порядок отработки заходок для повышения их устойчивости.

*Слоевая камерно-целиковая система разработки, очистная заходка, напряжения, разрушения*

При подземной разработке слабоустойчивых, богатых крутопадающих рудных тел применяются, как правило, варианты слоевой системы отработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Месторождение по глубине разделяется на этажи (блоки), в пределах которых для увеличения производительности выемки одновременно может отрабатываться несколько подэтажей. В зависимости от устойчивости очистных заходок при выемке запасов в слое применяются как восходящий, так и нисходящий порядок отработки.

Подземная разработка кимберлитовой трубки “Интернациональная” АК “АЛРОСА”, представляющей собой вертикальную рудное тело с овальной формой поперечного сечения (80–90 ÷ 60–70 м), ведется горизонтальными слоями высотой 4–5 м по камерно-целиковой схеме заходками шириной 5–6 м. Опыт ведения горных работ показал, что основные проблемы по обеспечению устойчивости очистных заходок при увеличении глубины разработки возникают в разрезных слоях [1–4].

В настоящей работе приводятся результаты анализа изменений геомеханической ситуации в окрестности заходок при различных технологических схемах отработки разрезных слоев в надработанном массиве.

### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА

Для оценки состояния горных выработок и конструктивных элементов систем разработки применяются классификационные системы, основанные на оценке механических свойств горного массива. К ним можно отнести методику К. Мэтьюза (RMR) [5], метод Бартона ( $Q$  индекс) [6], методики Д. Лобшера (MRMR) [7], Н. С. Булычева [8] и др. Данные методики основаны на расчетах категории устойчивости массива горных пород, позволяют классифицировать качество породных массивов и устанавливать факторы, определяющие устойчивость выработок и подземных конструкций.

Успешность применения классификационных систем определяется достоверностью и детальностью получения исходной информации о состоянии и свойствах горного массива, учесть которые в полной мере в эмпирическом анализе не представляется возможным, так как для каждого месторождения и горнотехнической ситуации характерны специфические комбинации геологических и геомеханических условий. Разработка надежных методов оценки устойчивости подготовительных и очистных выработок возможна на основе анализа и учета особенностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) их приконтурной зоны в качестве инструмента геомеханического прогнозирования для конкретных условий месторождения. Роль напряженного состояния массива существенно возрастает при проведении горных выработок на больших глубинах и в зоне влияния очистной выемки, когда напряжения сопоставимы или превышают прочность горных пород. В таких условиях классификационные системы при проектировании могут оказаться неэффективными. Поэтому при решении задач горной практики наряду с эмпирическим анализом получили широкое развитие численные и экспериментально-аналитические методы исследований [2–4, 9, 10], позволяющие учитывать изменение НДС в окрестности горной выработки в процессе развития горных работ. Использование методов численного моделирования НДС массива горных пород в комплексе с результатами натурных наблюдений за деформированием приконтурного массива выработок способствует получению более надежной оценки и достоверного прогноза устойчивости конструктивных элементов систем разработки [9].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД РУДНИКА “ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ”

Для обоснованного подхода и выбора рациональных параметров применяемых систем разработки, прогноза и обеспечения устойчивости их конструктивных элементов в горно-геологических условиях рудника “Интернациональный” выполнено численное моделирование НДС горного массива в процессе отработки и закладки заходов в разрезном слое. Для численного решения задач использован метод граничных интегральных уравнений [2–4, 9, 10]. В расчетах приняты: модуль упругости рудного массива  $E = 1.2 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$ . Экспериментальные данные о параметрах естественного поля напряжений, полученные для условий рудника “Интернациональный”, позволяют принять:  $\sigma_y^\infty = -\gamma H$ ,  $\sigma_x^\infty = -\lambda \gamma H$ ,  $\lambda = 0.7$ , где  $\sigma_y^\infty$ ,  $\sigma_x^\infty$  — соответственно вертикальная и горизонтальная компоненты напряжений,  $\lambda$  — коэффициент бокового распора,  $\gamma$  — объемный вес пород,  $H$  — глубина разработки. Интерпретация результатов проводится по численным значениям компонент напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и напряжений  $\sigma_s$  (сдвигающих напряжений), построенных с учетом критерия Кулона–Мора:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2 \varphi} \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  — главные напряжения;  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

Кимберлиты являются малопрочными и средней прочности рудами, имеют среднюю степень трещиноватости. Трещины залечены галитом и сульфатами, что обуславливает их слабую устойчивость, исключая накопление упругой энергии, поэтому они не рассматриваются как потенциально удароопасные.

#### ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНОГО ВАРИАНТА РАЗВИТИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ В СЛОЕ

В соответствии с проектом ООО “Институт “Гипроникель” (г. Санкт-Петербург) слоевая отработка запасов блока №7/8, расположенного на глубине 780 ÷ 960 м от поверхности, осуществлена в нисходящем порядке. В блоке выделены разрезные слои, разделяющие его на подэтажи (по 6 слоев в каждом). Для обеспечения производительности рудника очистные работы проведены одновременно в трех подэтажах путем послышной их отработки под искусственной кровлей. Выемка запасов разрезных и рабочих слоев выполнена комбайновым комплексом по камерно-целиковой схеме заходками в три стадии (рис. 1).

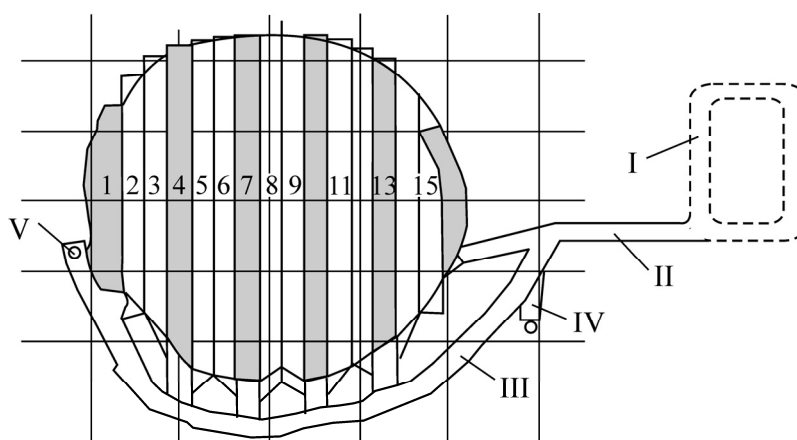


Рис. 1. Схема подготовки и отработки заходок первой очереди разрезного слоя 16: I — спиральный съезд; II — слоевой заезд; III — вентиляционно-закладочный штрек; IV — рудоспуск; V — вентиляционный восстающий; 1–16 — номера лент; серым цветом выделены ленты первой очереди

Установлено, что в разрезных слоях частичные разрушения отмечаются преимущественно в кровле и бортах заходок вблизи приконтактной зоны. Наиболее отчетливо разрушения проявились при отработке нижнего разрезного слоя блока № 7/8. При проходке заходок первой очереди (с шириной целиков, равной ширине двух заходок) наблюдались разрушения приконтурного рудного массива с выраженной закономерностью расположения нарушенных зон: в периферийных заходках — в пятах свода и на участках кровли, расположенных ближе к центру рудной трубки (рис. 2а); в заходках центральной части трубки — шелушение руды по всей длине заходок симметрично по контуру кровли. Исследования распределения НДС в приконтурной части заходок показали, что асимметрия разрушений в пятах свода вызвана высокой концентрацией напряжений  $\sigma_s$  в этих зонах (рис. 2б). По результатам визуальных наблюдений и численных расчетов выявлено, что разрушение приконтурного массива происходит в зонах, где  $\sigma_s > 4$  МПа [9].

Правомерность полученных численными методами закономерностей формирования НДС в приконтурной части заходок подтверждена результатами наблюдений за фактическим состоянием и разрушением рудного массива при отработке в контактной зоне заходок второй очереди, расположение которых планировалось “вприсечку” к заходкам первой очереди со стороны центра трубки. Расчеты показали, что в кровле и верхней половине рудного борта за-

ходки второй очереди формируются зоны повышенных напряжений  $\sigma_s$  (до 6 МПа), превышающих предельные значения (рис. 3а). При порядке выемки заходки второй очереди “вприсечку” к заходке первой очереди со стороны контакта трубки с вмещающим массивом зона повышенных сдвигающих напряжений формируется в нижней половине рудного борта и в кровле над заложеной заходкой первой очереди (рис. 3б).

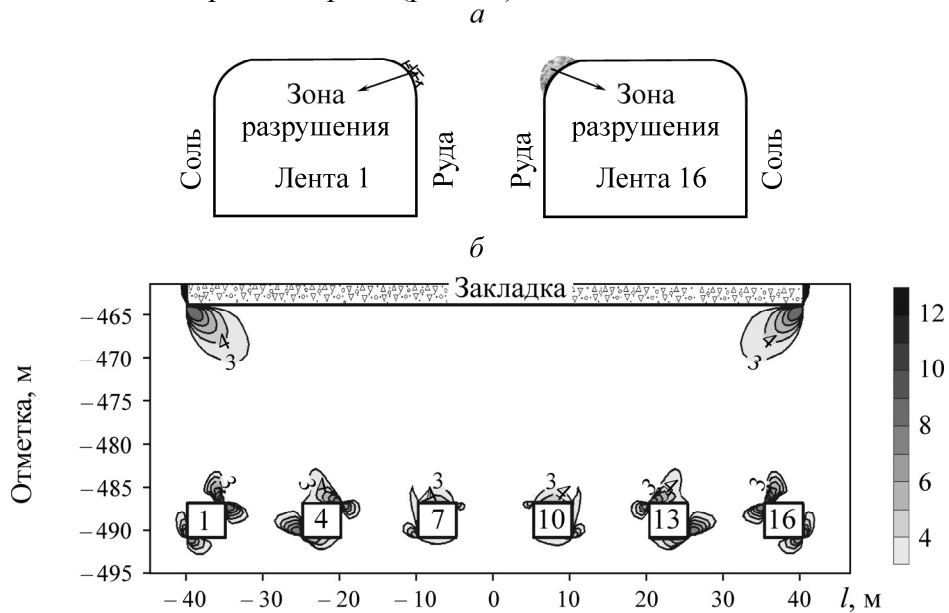


Рис. 2. Расположение зон разрушения контура лент 1 и 16, пройденных вдоль контакта с вмещающими породами (а); напряжения  $\sigma_s$  (МПа) при отработке заходок первой очереди через две заходки (б)

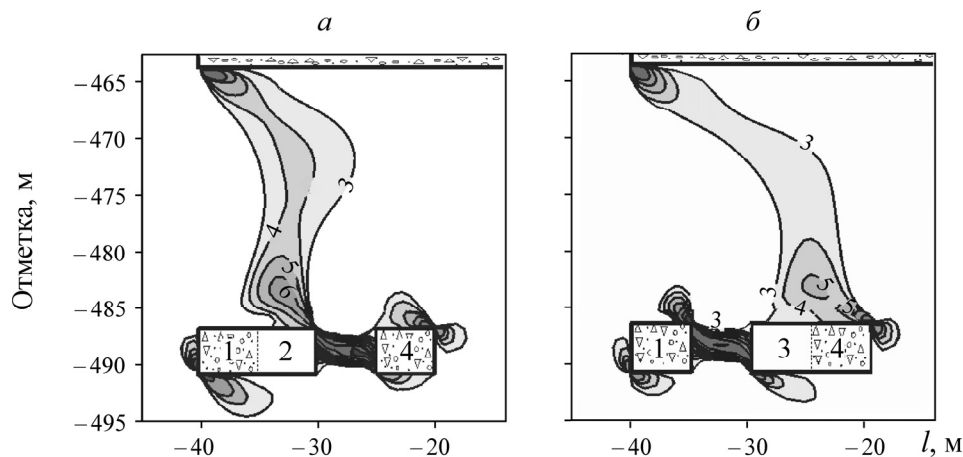


Рис. 3. Сдвигающие напряжения  $\sigma_s$  (МПа) при отработке заходок второй очереди в приконтактной зоне разрезного слоя “вприсечку” к заходке первой очереди: а — со стороны центра слоя; б — со стороны контакта с вмещающими породами

Предложенный вариант позволяет снизить объемы разрушений в кровле очистной заходки второй очереди. В оставшемся целике (заходке третьей очереди) в обоих случаях  $\sigma_s$  превосходят сцепление массива в 1.5–2 раза. Результаты наблюдений за фактическим состоянием заходки второй очереди в ленте 3 свидетельствуют о том, что разрушений в кровле не происходило, при этом глубина зоны вывалов в ее боку на момент сдачи заходки под закладку достигла 2 м (рис. 4).

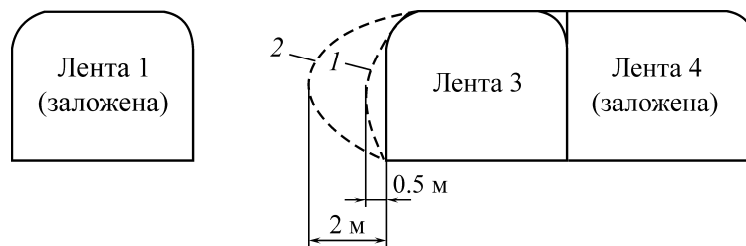


Рис. 4. Контуры разрушения рудного бока заходки по данным визуальных наблюдений: 1 — при формировании заходки; 2 — на момент сдачи заходки под закладку

Анализ формирования НДС массива при отработке заходок второй очереди показал, что по условиям устойчивости кровли и рудного борта наиболее благоприятным вариантом является их проходка “вприсечку” к ранее отработанным и заложенным заходкам первой очереди со стороны ближнего к ним контакта рудного тела с вмещающим массивом [4].

#### ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ

При понижении горных работ применение проектного варианта с камерно-целиковой трехстадийной схемой отработки разрезного слоя приведет при прочих равных условиях к увеличению параметров зон запредельного деформирования приконтурного массива с сохранением закономерности их расположения на контуре очистных заходок.

Для выбора наиболее рациональных схем и порядка отработки заходок разрезного слоя проведем анализ формирования НДС в их окрестности на примере разрезного слоя 16 (на глубине около 900 м от поверхности) при различных вариантах ведения горных работ.

**Отработка запасов слоя двумя фронтами от флангов к центру (вариант 1).** Очистные работы в слое начинаются с первоочередной отработки крайних лент для надежного оконтуривания рудного тела, а также для ускорения начала очистной выемки нижележащего слоя на участках под закладкой с максимальной прочностью. Последующая отработка запасов осуществляется путем поочередной выемки заходок “вприсечку” к ранее отработанным и заложенным с образованием двух фронтов очистных работ (рис. 5).

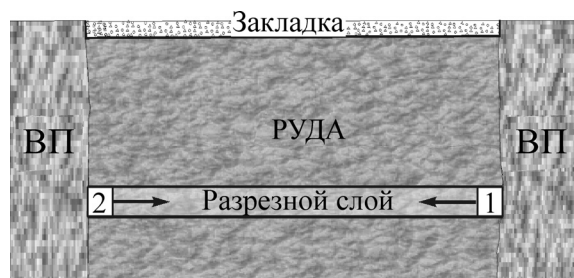


Рис. 5. Схема развития работ в слое от флангов к центру: ВП — вмещающие породы

Результаты численных расчетов (рис. 6) показали:

— при выемке по схеме от флангов к центру разрушения рудного массива будут происходить уже в крайних заходках (1, 2) в пятах свода и в части кровли со стороны центра трубки (слева — для ленты 1 и справа — для ленты 2, рис. 6а);

— по мере развития фронтов очистных работ к центру трубки параметры зоны запредельного деформирования ( $\sigma_s > 4$  МПа) в пятах свода и кровле возрастают (рис. 6б), а при приближении к центральной части трубки распространяются по всему контуру выработок (рис. 6в). Очевидно, что такое распределение напряжений потребует усиленного крепления очистных заходок.

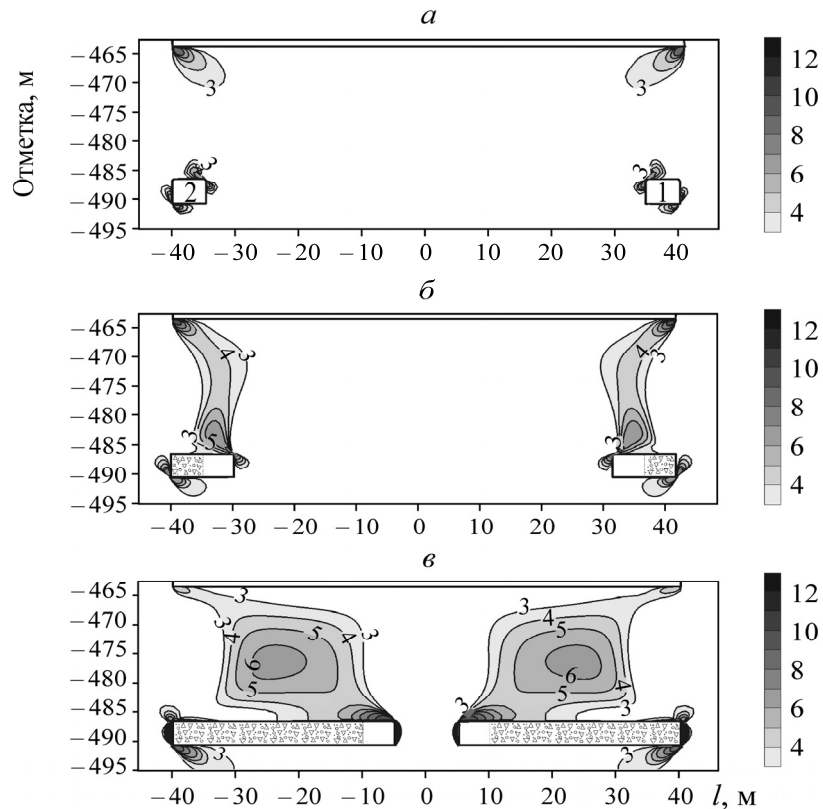


Рис. 6. Изолинии распределения  $\sigma_s$  (МПа) в окрестности очистных заходок по мере развития очистных работ в слое от фланга к центру

**Отработка запасов слоя двумя фронтами в направлении от центра к флангам (вариант 2).** Создаются два фронта развития очистных работ путем поочередной выемки и закладки двух заходок в центральной части рудного тела. В соответствии с технологической инструкцией [1] размер целика между ними должен составлять две ширины заходки (рис. 7). Однако результаты выполненных расчетов свидетельствуют о том, что ширина целика в центральной части трубки для условий надработки может быть принята равной ширине одной заходки, что по фактору горного давления практически не влияет на устойчивость заходок и целика между ними: в обоих случаях максимальные значения  $\sigma_s$  ( $\approx 4$  МПа) и зоны их действия практически не различаются.

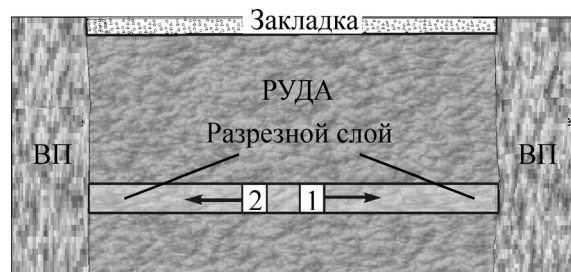


Рис. 7. Схема развития работ в слое от центра к флангам

Результаты численных расчетов НДС при отработке запасов разрезного слоя от центра к флангам представлены на рис. 8 и рис. 9.

Отработка “вприсечку” по одной заходке к ранее пройденным (рис. 8) не изменяет характер действующих напряжений в кровле и бортах: зона запредельного деформирования  $\sigma_s$  формируется в припочвенной части обрабатываемых заходок, а также в кровле первых двух ранее пройденных и заложённых заходок. При этом отмечается тенденция роста вертикальных напряжений в рудном борту при приближении заходок к контакту с вмещающими породами, а также в оставленном целике в центре трубки. При отработке двух крайних заходок в кровле появляется зона растягивающих горизонтальных напряжений, что снижает устойчивость заходок.

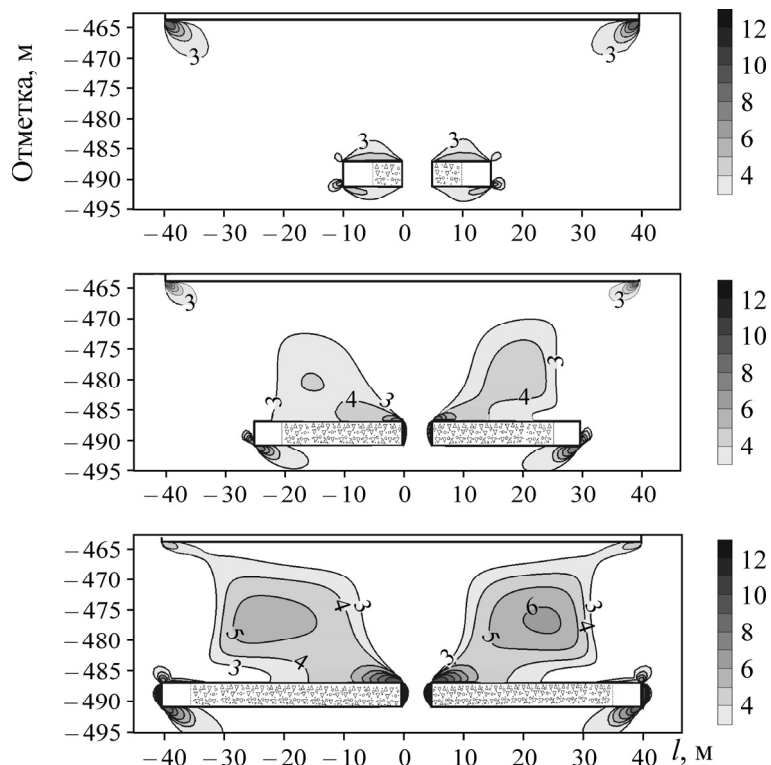


Рис. 8. Распределение  $\sigma_s$  (МПа) при развитии очистных работ от центра к флангам

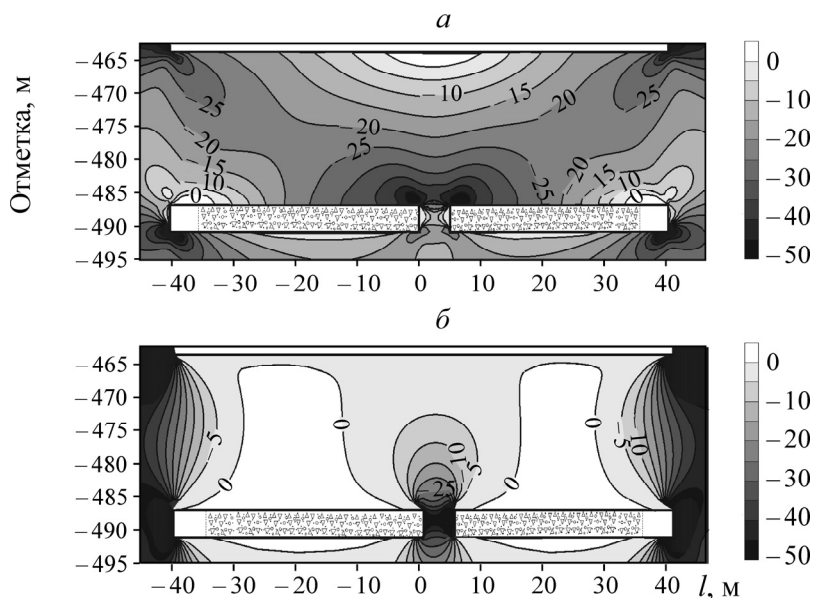


Рис. 9. Распределение горизонтальных (а) и вертикальных (б) компонент напряжений (МПа) на завершающей стадии отработки слоя

Проведенный анализ варианта развития горных работ в разрезном слое от центра к флангам свидетельствует о следующем:

- за счет перераспределения максимальных напряжений в нижнюю часть борта и в почву отработываемых заходок повышается их устойчивость, что позволяет сократить затраты на крепление;
- отработка протяженных заходок в центральной части трубки проводится в благоприятных по устойчивости бортов условиях;
- отработка менее протяженных заходок в приконтактной части рудного массива потребует обязательного крепления их рудного борта и кровли (две крайние заходки).

Положительная роль целика, временно оставленного в центральной части трубки, заключается в ограничении прогиба рудной кровли на начальном этапе разработки разрезного слоя. Дополнительный прогиб, вызванный его отработкой на завершающем этапе, приводит к более плавному, равномерному распределению нагрузки на уже набравший прочность закладочный массив, не приводя к пригрузке отдельных лент (как это случается при камерно-целиковой схеме). Для улучшения условий выемки оставленного в центре трубки целика целесообразно ограничить его размер шириной в одну заходку. В этом случае не возникнет проблем с поддержанием бортов заходки, сформированных из закладки.

Недостаток предложенного варианта отработки разрезных слоев при увеличении расстояния переезда комбайна (нагрузки на ходовую часть) оправдан, по нашему мнению, более благоприятными условиями ведения горных работ с точки зрения затрат на поддержание заходок и повышения безопасности работ. По мере увеличения глубины разработки и роста горного давления вопросы обеспечения устойчивости заходок и безопасности отработки разрезных слоев приобретают особую актуальность. В этой связи сокращение сроков отработки разрезного слоя также оказывает положительное влияние на устойчивость заходок, снижая затраты на их поддержание.

**Отработка запасов слоя с развитием очистных работ в направлении от центра к флангам с делением разрезного слоя на три панели (вариант 3).** Рассмотрим особенности формирования НДС в надработанном рудном массиве на различном удалении разрезного слоя от почвы отработанного вышележащего слоя. По результатам численных расчетов установлены изменения углов главных осей напряжений в надработанном массиве, позволяющие по характеру действующих напряжений выделить три зоны I–III (рис. 10).

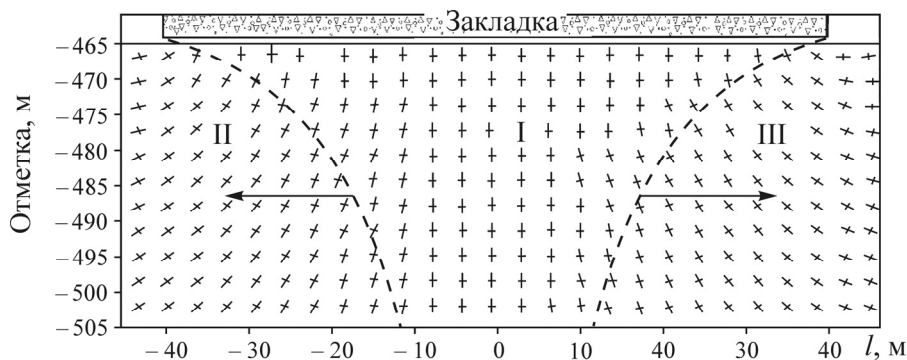


Рис. 10. Углы главных осей напряжений в надработанном массиве

В зоне I, частично разгруженной от вертикальных напряжений (эффект наработки), направления действия главных напряжений (вертикально вверх – горизонтально) не создают асимметрии при нагружении приконтурной зоны заходок. В зонах II и III углы главных напряжений косо направлены по отношению к горизонту, что приводит к возникновению асимметрии при распределении напряжений в приконтурной части заходок с появлением предельных значений  $\sigma_s$ . В этих зонах для улучшения условий поддержания заходок важен выбор порядка отработки и направления развития очистной выемки.



С учетом этих особенностей перераспределения напряжений в надработанном массиве, а также с целью сокращения перегона комбайна и создания большего числа фронтов развития работ (т. е. большей маневренности и увеличения времени набора прочности закладки при ведении горных работ “вприсечку” к ранее отработанным заходкам) рассмотрим вариант разрезки с делением слоя на три панели (рис. 11).

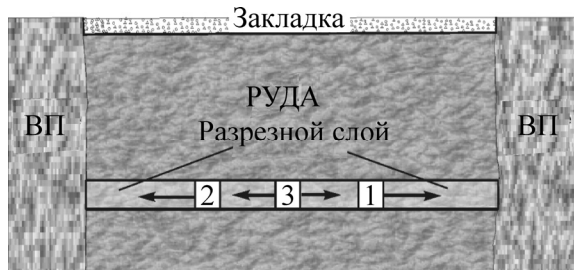


Рис. 11. Схема развития работ с делением разрезного слоя на три панели

Разрезной слой следует разделять проходкой лент 1 и 2 на три панели. Местоположение заходок выбирается в зависимости от расстояния разрезного слоя до почвы отработанного ранее очистного пространства с учетом границ, отмеченных на рис. 10 штриховой линией (в нашем случае, при проектном расположении разрезного слоя, панели приблизительно равны по длине). В свою очередь средняя панель разделяется заходкой 3 на две равные части. Ведение очистных работ осуществляется в направлении от центра к флангам путем отработки заходок “вприсечку” к ранее отработанным и заложенным заходкам (в центральной части панели отработка запасов проводится путем поочередной “присечки” слева и справа от заложенной заходки).

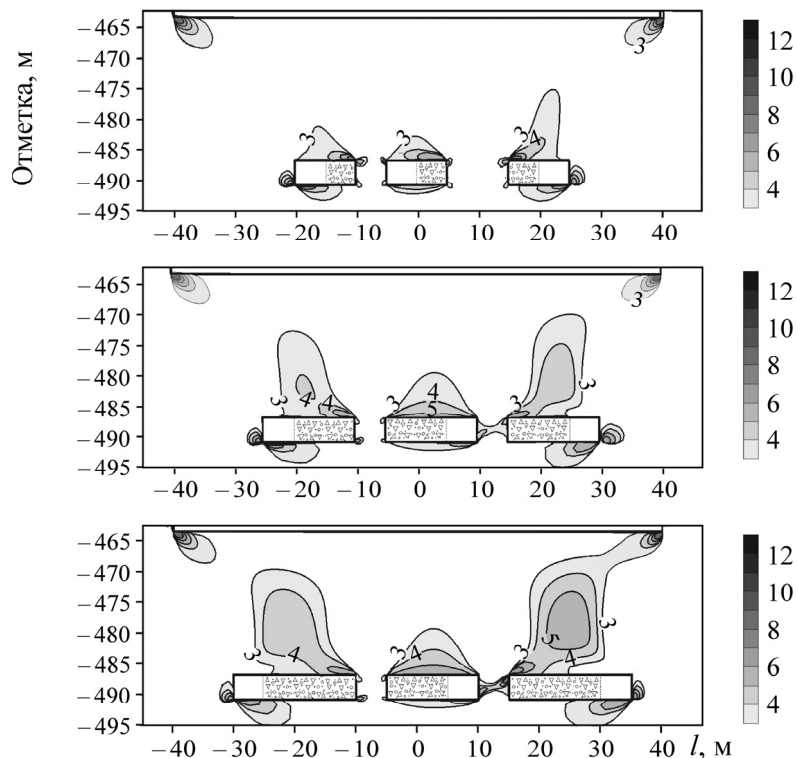


Рис. 12. Распределение  $\sigma_s$  (МПа) при развитии очистных работ с делением разрезного слоя на три панели

Численная оценка формирования НДС в окрестности заходок для рассмотренной схемы развития очистных работ в разрезном слое (рис. 12) позволяет отметить следующее:

— основные закономерности распределения напряжений, установленные для ранее рассмотренного варианта развития работ “от центра к флангам”, сохраняются (главная из них — локализация предельных сдвигающих напряжений в почве заходок);

— “присечка” заходок в центральной части трубки в зонах стыковки с панелями 2 и 3 приводит к увеличению  $\sigma_s$  в кровле отработанного участка, что усложнит условия их поддержания при ширине целика, равной ширине заходки.

### ВЫВОДЫ

С использованием экспериментально-аналитического метода определено критическое значение сдвигающих напряжений рудного массива, позволяющее прогнозировать параметры зон неупругих деформаций конструктивных элементов камерно-целиковой системы разработки для геомеханических условий рудника “Интернациональный”.

Для проектного варианта разрезного слоя в надработанном массиве с применением камерно-целиковой трехстадийной схемы развития горных работ установлен оптимальный порядок отработки камер второй очереди, обеспечивающий повышение устойчивости их кровли за счет перераспределения предельных сдвигающих напряжений в почву и нижнюю часть рудного борта.

Выявлены закономерности распределения напряжений в окрестности заходок разрезного слоя при развитии горных работ двумя фронтами: от флангов к центру и от центра к флангам. Показано, что применение схемы отработки от центра к флангам обеспечивает большую устойчивость очистных заходок и, как следствие, меньшие затраты на их крепление.

При выборе технологической схемы развития горных работ “от центра к флангам” целесообразность деления разрезного слоя на две или три панели определяется размерами рудного тела и выбранной высотой подэтажа по результатам оценки технико-экономических показателей отработки слоя, включающих затраты на крепление очистных заходок и производительность работы комбайна с учетом его передвижений к очистным фронтам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Временная технологическая инструкция** по применению слоевой системы разработки с твердеющей закладкой на руднике “Интернациональный”. — Мирный: Якутнипроалмаз, 2004.
2. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н., Крамсков Н. П.** Напряженное состояние рудного массива при слоевой системе разработки в восходящем порядке // ФТПРПИ. — 2002. — № 6.
3. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Геомеханические условия применения слоевой системы разработки кимберлитовой трубки “Интернациональная” // ФТПРПИ. — 2009. — № 2.
4. **Барышников В. Д., Гахова Л. Н., Латынин В. В.** Геомеханические условия отработки разрезных слоев при слоевой нисходящей системе разработки с твердеющей закладкой // ГИАБ. — 2010. — № 7.
5. **Mathews K. N., Hoek E., Wyllie D. C., and Stewart S. B. V.** Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1,000 meters in hart rock. Golder Associates Report to Canada Centre for Mining and Energy Technology (CAANMET), Department of Energy and Resources, Ottawa, Canada, 1980.
6. **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.
7. **Laubscher D. N.** A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mini design, J S Afr Min Metall, 1990, Vol. 90, No. 10.
8. **Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1989.
9. **Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — Новосибирск. — 2012. — № 4.
10. **Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г.** Геомеханический мониторинг при разработке полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.

*Поступила в редакцию 24/X 2015*