

**Горный проектно-изыскательский научно-исследовательский институт
ООО "МАЙНИНГ ПРО"**

**Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения
Российской академии наук**

**Геомеханическое обоснование параметров подземных
технологий в сложных горно-геологических условиях
больших глубин, как неотъемлемая часть проектных
работ (на примере Октябрьского рудника)**

**Неверов Александр Алексеевич зам. директора по науке, кандидат
технических наук, ведущий научный сотрудник ИГД СО РАН**

2019

Проблема:

1. Горно-геологические условия Октябрьского месторождения относятся к особо сложным и не подпадают под действия свода правил СП 91.13330.2012 "Подземные горные выработки", которые не распространяются на проектирование горных выработок, проходимых в зонах повышенных тектонических напряжений. Это потребовало выполнение исследований по геомеханическому обоснованию горных работ.
2. Вследствие выбывания из эксплуатации в среднесрочном периоде запасов и отсутствие активного их воспроизводства на действующих рудниках актуальными и чрезвычайно востребованными становятся вопросы повторной разработки различного рода ранее оставленных целиков.

Обобщенная цель:

Трёхмерная параметризация геомеханической модели месторождения, как платформа для управления оптимизацией и рисками рудника

Идея исследований состоит в использовании геолого-структурной и породной моделей в тесной взаимосвязи с трехмерным геомеханическим моделированием месторождения с целью оптимизации параметров горнотехнических конструкций и снижения рисков на всех стадиях планирования горных работ.

Научная новизна исследований заключается в повышении надежности выбора и обосновании порядка и последовательности отработки рудных залежей, а также параметров систем разработки в рамках реализации трёхмерной геомеханической модели месторождения, обеспечивающей приемлемые уровни технологических и финансовых рисков для горнодобывающих компаний.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПАРАМЕТРЫ ИСХОДНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ТАЛНАХСКОГО И ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Важнейшим природным фактором, определяющим правильный выбор геотехнологий и их параметров, эффективный расчет устойчивости конструктивных элементов систем разработки, достоверный прогноз характера и формы проявления горного давления, является естественное поле напряжений разрабатываемого массива пород. Иначе говоря, технология подземной добычи не может считаться безопасной, если при ее обосновании не учтены параметры реального тензора напряжений. Все это явилось основанием для разработки методологии выбора геотехнологий на базе прогнозной оценки напряженного состояния массива пород с ростом глубины на стадии проектирования и строительства горного предприятия с целью повышения точности и безошибочности принятых технологических решений. Важность поднятой проблемы обуславливается еще и тем, что уже сегодня действующие рудники нередко несут большие убытки, связанные с непредвиденными работами в экстремальных условиях отработки больших глубин из-за недооценки геомеханической обстановки на м

В рамках работы нами реализована методика прогноза исходного поля напряжений массива горных пород "Талнахского и Октябрьского" месторождений по типу тектонических структур (тектонотип массива).

Тектоническая геомеханическая модель

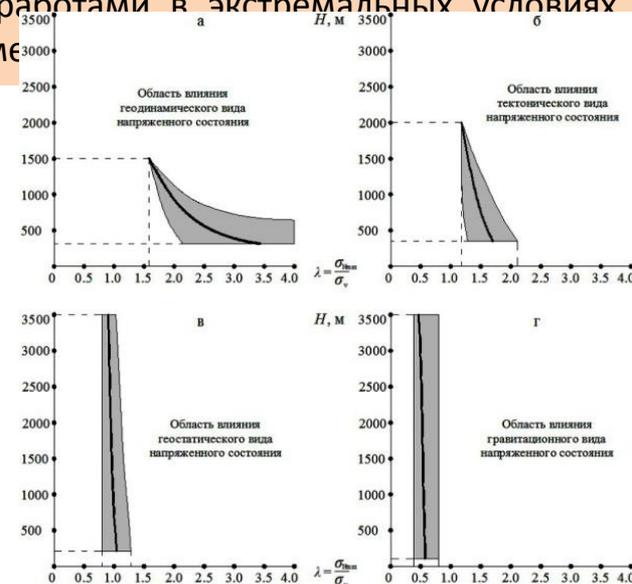
$$\sigma_{H \max} > \sigma_v \geq \sigma_{h \min}$$

$$\sigma_{H \max} = 2,8 e^{\kappa \lambda} \gamma H^{0.7} \approx \sigma_1$$

$$\sigma_{h \min} = (0,60 \div 0,70) \sigma_{H \max} \approx \sigma_2,$$

$$\sigma_v \approx \gamma H \approx \sigma_3,$$

Графическая интерпретация видов напряженного состояния массивов пород с ростом глубины выемки:
 а) геодинамический вид напряженного состояния;
 б) – тектонический;
 в) – геостатический;
 г) - гравитационный.

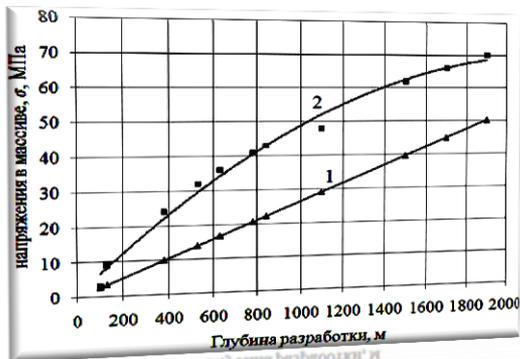


ПАРАМЕТРЫ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА ПОРОД ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Особенности геомеханических условий разработки северных залежей Октябрьского месторождения:

- **большая глубина залегания (от 800 до 2000 м);**
- **высокая тектоническая нарушенность района;**
- **преобладание разрывной тектоники, представленной взбросами, сбросами и сдвигами;**
- **руды и вмещающие породы относятся к опасным по горным ударам.**

Установлено, что исходное состояние массива горных пород Октябрьского месторождения, с учетом данных геодинамического районирования, анализа и обобщения предшествующих исследований, типизации и натуральных замеров, можно описать **тектонической моделью** с нелинейным изменением максимальных горизонтальных напряжений, которые с глубиной стремятся к вертикальным.



По физико-механическим и деформационно-прочностным свойствам руд и пород месторождение подпадает под структурную группу, для которой характерен выдержанный, без явных аномалий тектонический вид напряженного состояния.

Параметры поля напряжений, задаваемого на границах расчетной модели (по данным замерам ИГД СО РАН 2017г)

Глубина Н, м	σ_{Hmax} , МПа	σ_{Hmin} , МПа	σ_v , МПа
800	38,7	25,8	22,4
1000	47,2	30,8	28,0
1200	53,8	35,3	33,6
1400	59,0	39,2	39,2
1600	63,8	42,6	44,8
1800	67,2	45,4	50,4
2000	70,1	47,6	56,0

Зависимость действующих напряжений от глубины выемки: 1 — вертикальные; 2 — максимальные горизонтальные

ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ НДС МАССИВА ПОРОД И ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ВЫЕМКИ РУД

5

Нами предварительно были выполнены лабораторные испытания пород, которые обусловили необходимость оценки их прочностных свойств в условиях недостаточной информационной базы.

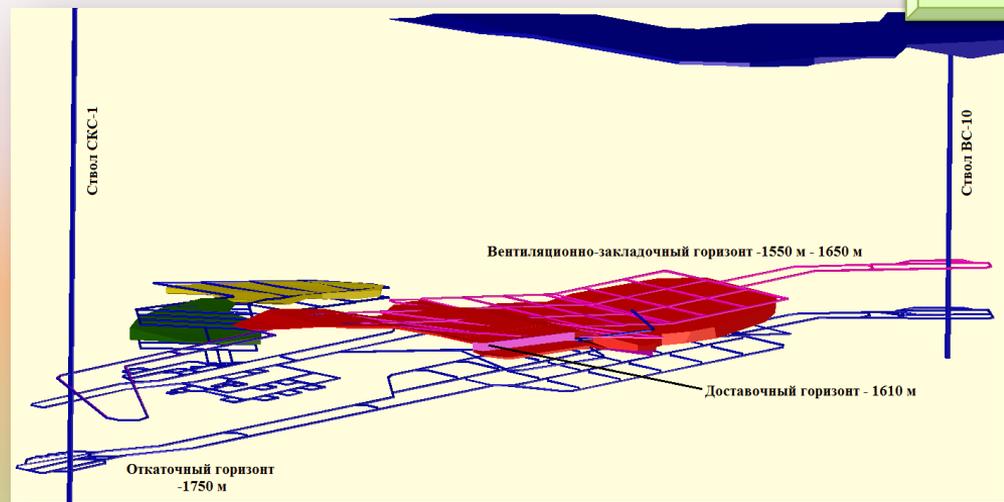
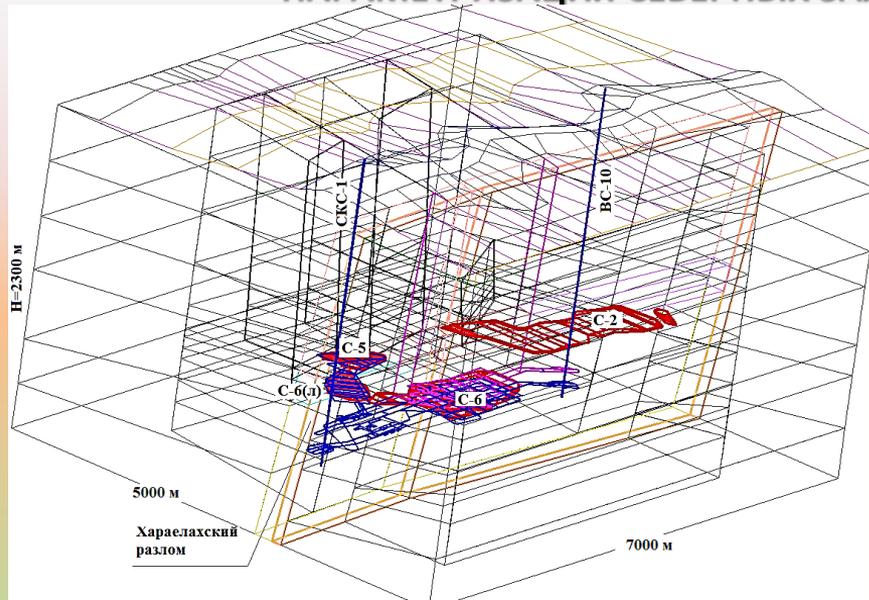
Значения расчетного модуля упругости для 3-D моделирования НДС горнотехнической ситуации в пределах залежей С-5, С-6 и С-6л Октябрьского месторождения

Литология пород	Модуль упругости в ненарушенном массиве (E_n)*, ГПа	Эффективный (приведенный) модуль упругости, (E_e), ГПа
Песчаники, ангидрит-карбонатные отложения	55-70	21
Аргиллит	55-60	26
Ангидрит	64-70	32
Габбро-долерит	80-84	40
Вкрапленная руда	42-62	26
Богатая руда	47-70	30
Роговик зеленовато-серый	60-65	31

За счет естественной и техногенной трещиноватости модуль упругости нарушенного массива горных пород ориентировочно в **2,0 раза** меньше, чем в куске, испытанном в лабораторных условиях.

Из графиков зависимостей “напряжение σ – деформация ε ” установлено, что запредельная стадия деформирования пород близка к допредельному участку. Последнее позволяет утверждать, что породы Октябрьского месторождения склонны к хрупкому разрушению. В этих случаях, корректным для расчетов НДС массива пород будет являться использование упругой модели.

Угол внутреннего трения и сцепление принимаются существенно меньшими чем при испытании образцов т.е. **используется** коэффициент структурного ослабления. $K_c = 0,4-0,5$ эквивалентен среднетрещиноватым и $K_c = 0,1-0,3$ – соответствует сильнотрещиноватым горным массивам.



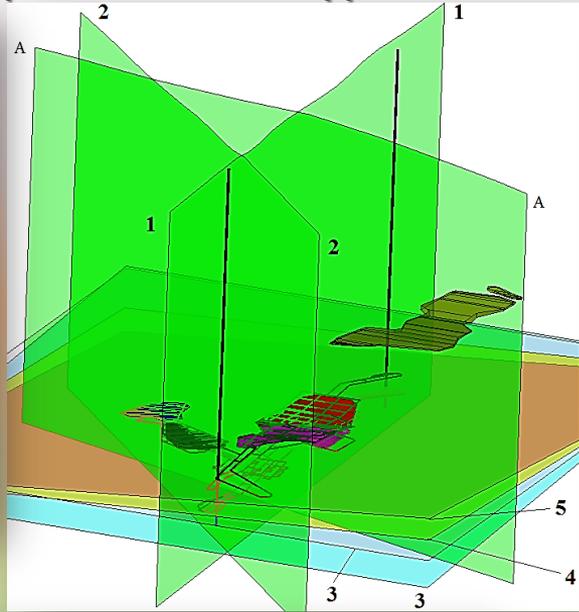
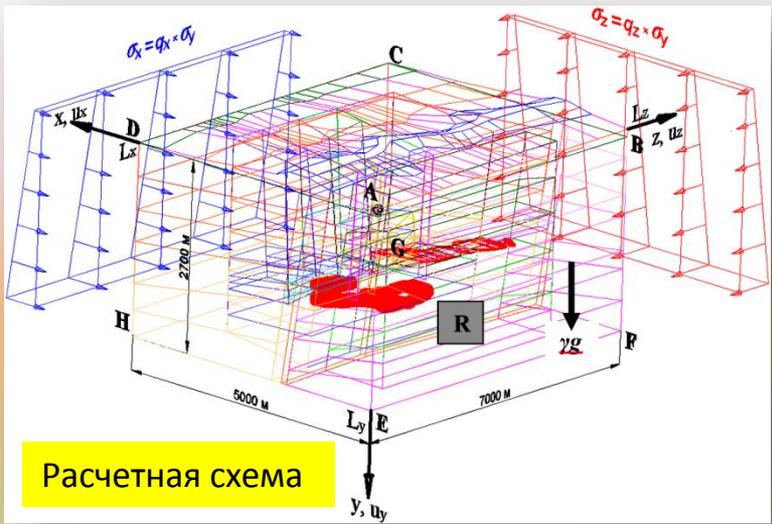
Разработана 3-D параметрическая модель Октябрьского месторождения путем геометрических построений на базе геодинамического районирования и графики, представленной в виде геологических планов и разрезов. Модель предназначена для технологического обоснования параметров выемки и численного моделирования НДС массива пород.

Разработанная модель включает в себя выработки: откаточного горизонта -1750 м, доставочного -1610 м / -1770м, вентиляционно-закладочного горизонта -1550 м ÷ - 1720 м.

Моделирование позволило осуществить **дифференцированный** подход к трассировке горных выработок.

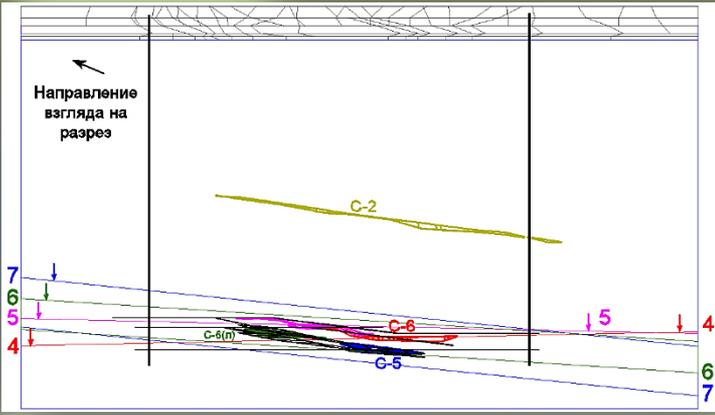
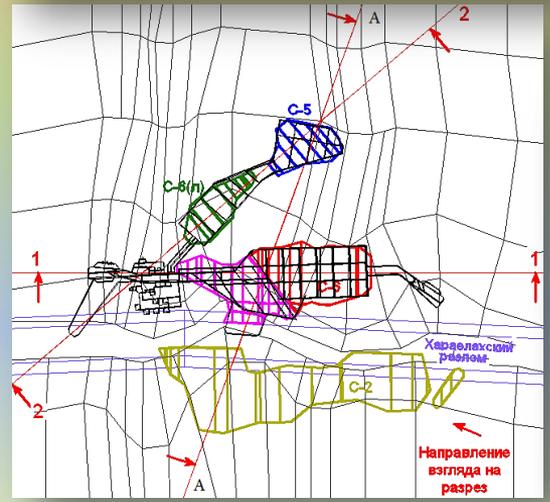
Обособление в локальный участок области исследований обусловлено необходимостью более точного учета (максимального приближения к реальной горнотехнической конструкции) системы горных выработок, объемов выработанных пространств и готовящихся к отработке выемочных единиц.

ОБЛАСТИ АНАЛИЗА НДС МАССИВА ПОРОД И РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

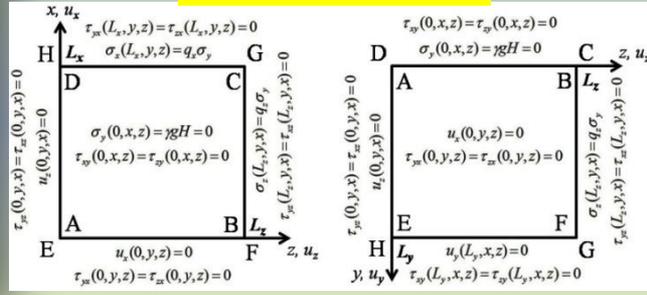


Исследования НДС массива пород и устойчивости горных выработок выполнены по разрезам:

- № 1** – вертикальный разрез по простиранию залежи С-6 между верт стволами СКС-1 и ВС-10;
- № 2** – вертикал. разрез по простиранию залежей С-6(л) и С-5;
- № 3** – горизонтальный разрез по выработкам откаточного горизонта -1750 м;
- № 4** – слабонаклонный разрез по выработкам доставочного горизонта -1610 м ÷ -1770 м;
- № 5** – слабонаклонный разрез по вентиляционно-закладочного горизонта -1550 м ÷ -1720 м.

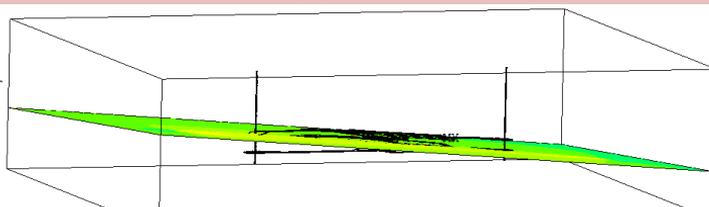
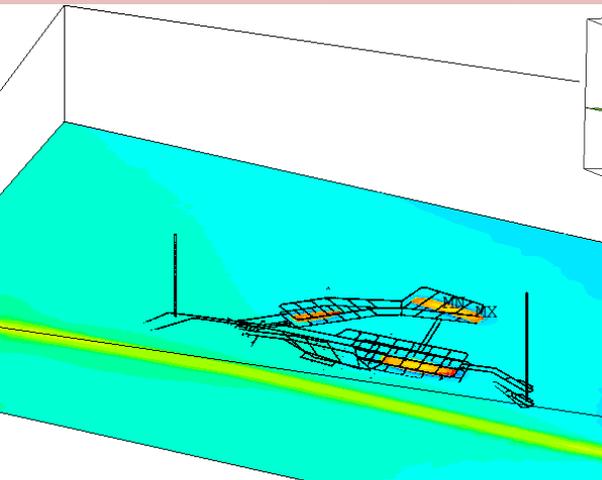


Расчетная схема

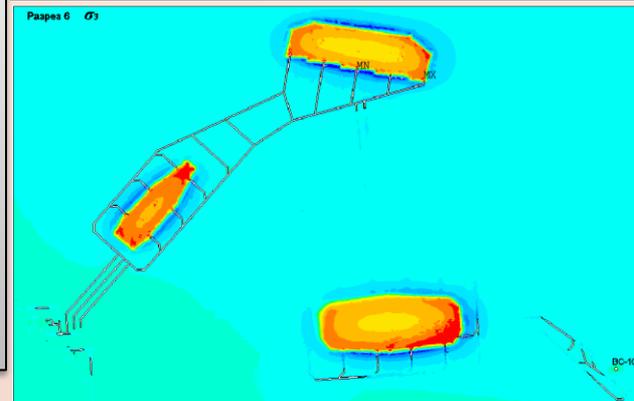
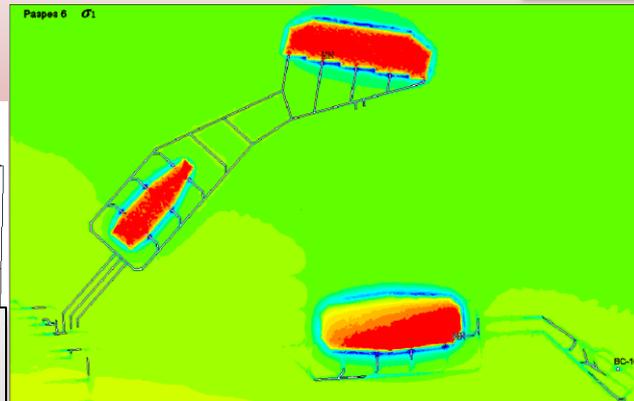


ОЦЕНКА НДС МАССИВА ПОРОД И УСТОЙЧИВОСТЬ ВСКРЫВАЮЩИХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПО ТРАССАМ ОСНОВНЫХ ГОРИЗОНТОВ

РАЗРЕЗЕ 6 (слабонаклонный разрез по выработкам добычного горизонта в границах залежей С-6(л) и С-5)



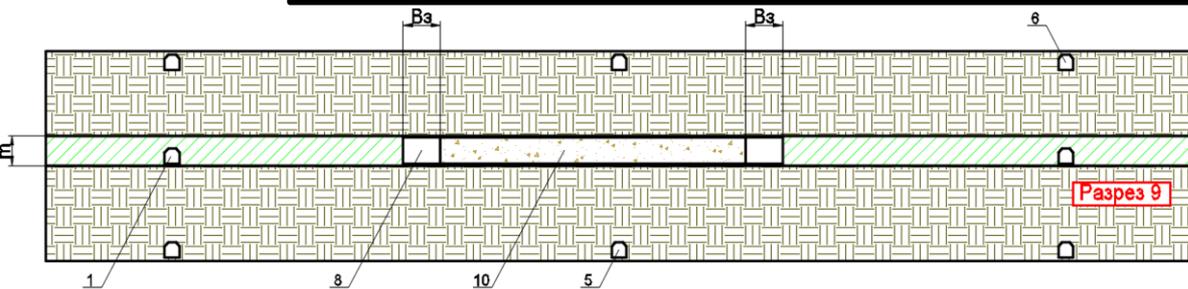
Значения напряжений для средне трещиноватых и ненарушенных горных пород, с точки зрения пределов их прочности, приближаются к предельным значениям, но не являются критическими в условиях объемного сжатия. Это позволяет оценивать горные конструкции и обнажения, как **неустойчивые** (локальные участки, требующие обязательного усиленного крепления) и **сред. устойчивости**. Ключевую роль на устойчивость оказывает мало прогнозируемая нарушенность реального массива.



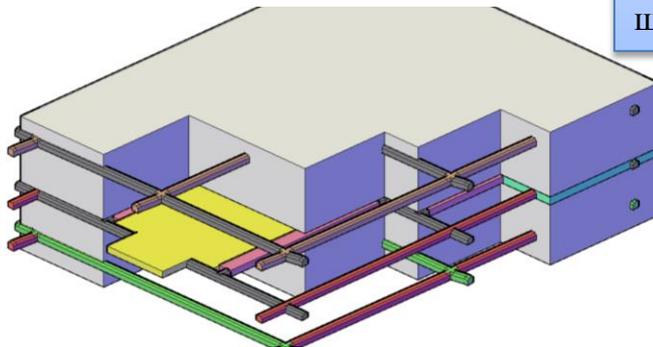
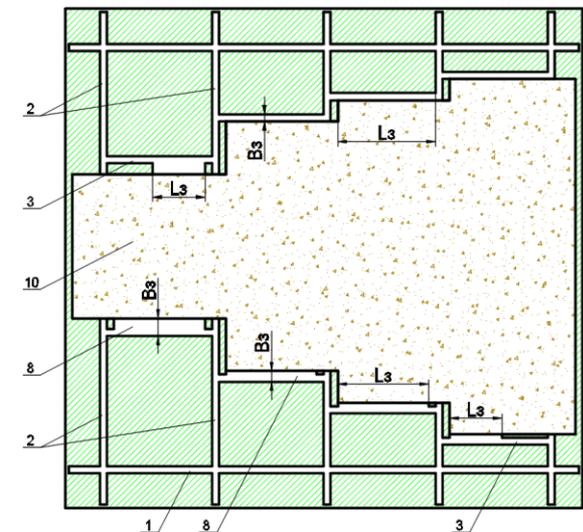
Во всех случаях по откаточному, доставочному и вент.-закл. гор. наибольшие значения макс сж напряжений отмечаются в местах сопряжения выработок различного назначения и области влияния очистных работ, в том числе в околоствольных дворах и по контуру вскрывающих стволов (отм. 1450-2000 м).

Наиболее неблагоприятные условия характерны для кровли и почвы горизонтальных и наклонных выработок, имеющих субмеридианальное ориентирование и в меньшей степени их бокам. В области влияния очистной выемки разрушениям подвержены, как кровля, так и бока подготовительных и нарезных выработок.

Сплошная слоевая система с выемкой запасов тупиковым забоем (ССС-Т)



Сущность – при неустойчивой кровле проходится разрезной штрек с креплением, в зависимости от его состояния он расширяется (закладывается), после твердения закладки проходится ещё один в присечку. При среднеустойчивой и устойчивой кровле выемка ведётся тупиковыми заходками шириной 6-8 м с креплением кровли.

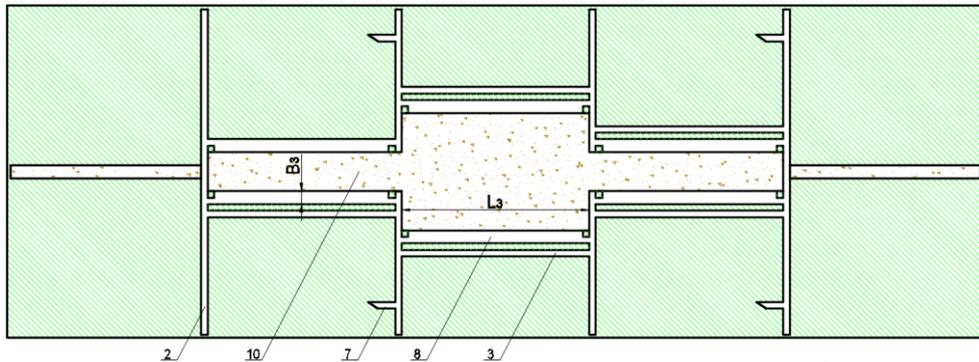


Обоснование системы разработки осуществлялось для следующих **горнотехнических** условий: глубина – $H = 1800$ м; ширина очистной заходки – $B_з = 4,0; 6,0; 8,0; 10,0$ м; длина очистной заходки – $L_з = 30,0; 60,0; 108,0$ м; мощность рудного тела – $m = 4,0; 7,0$ м.

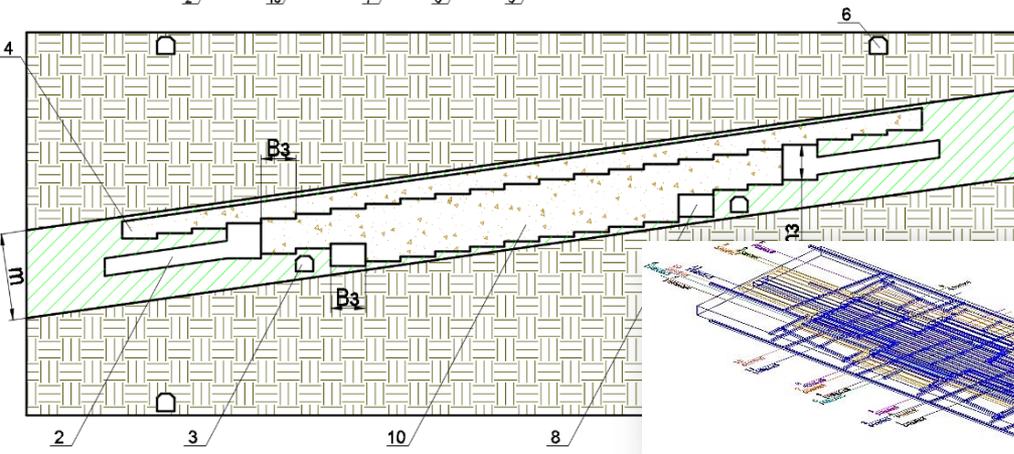
При небольшой (до 7 м) высоте очистных заходок необходимый уровень безопасности может быть обеспечен правильным выбором типа и параметров крепления.

Недостатки: постоянное нахождение горнорабочих в выемочном очистном пространстве, в том числе и при отработке руд на участках с сильной нарушенностью кровли.

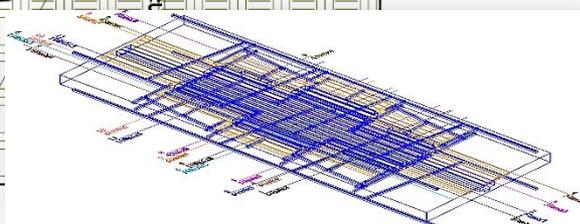
Сплошная слоевая система разработки с нисходящим порядком выемки (ССС-н)



Сущность. Залежь разделяется на панели длиной 120 м и шириной, равной размерам залежи. В пределах панели нарезаются блоки, которые разбиваются на вертикальные полосы (ленты). При этом каждую ленту делят по вертикали на горизонтальные слои, обрабатываемые заходками шириной и высотой 6-8 м последовательно по сплошной схеме в нисходящем порядке.



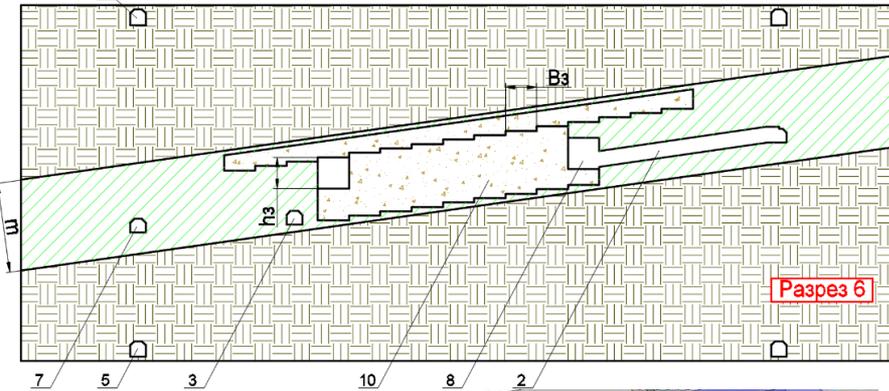
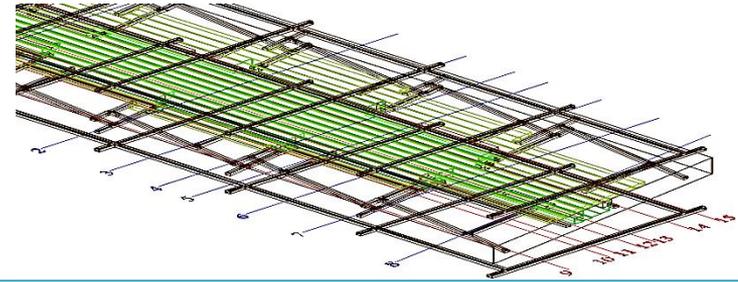
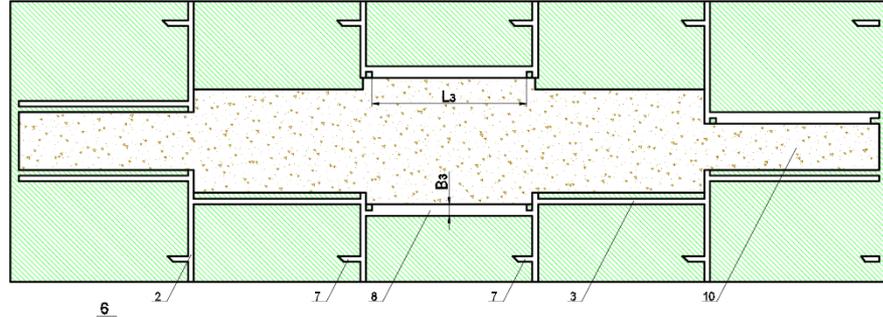
Опыт и практика применения системы на Норильских рудниках свидетельствует о ее эффективности при отработке залежей мощностью не менее 12 м.



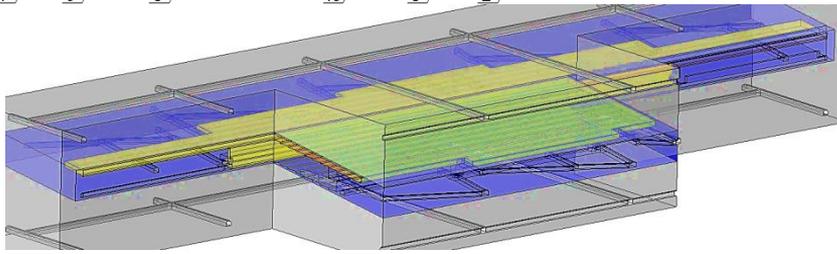
Обоснование осуществлялось для следующих **горнотехнических** условий: $H = 1800$ м; ширина заходки – $B_z = 6,0; 8,0$ м; длина заходки (слоя) – $L_z = 30,0; 45,0; 60,0; 108,0$ м; высота заходки (слоя) – $h_z = 5,0; 6,0$ и $8,0$ м; мощность рудного тела – $m = 16,0$ м

Достоинства - ведение очистных работ под искусственной кровлей, создаваемой в процессе отработки запасов вышележащего слоя, что позволяет **успешно** применять её при неустойчивых рудах, в самых сложных горно-геологических и горнотехнических условиях сверх глубин.

Сплошная слоевая система с комбинированным порядком выемки слоев (ССС-к)



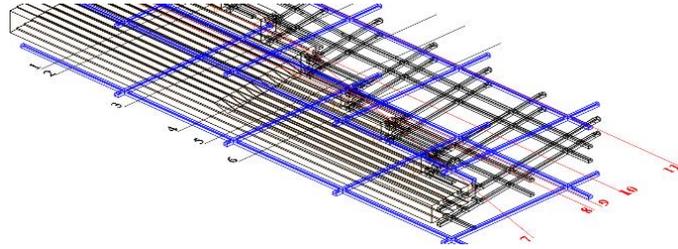
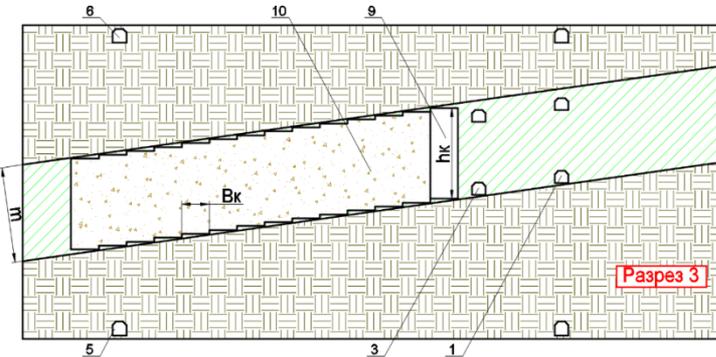
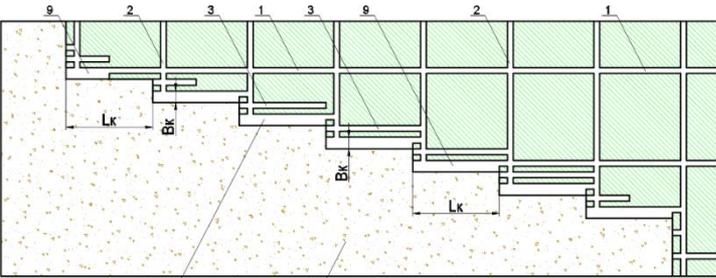
Сущность. По кровле залежи с опережением обрабатывается защитный слой. Выемка запасов в защищённой зоне ведётся слоями снизу-вверх при высоте отбиваемого слоя до 4-6 м и общей высоте заходок до 8-10 м. После зачистки почвы заходка закладывается на высоту отбитого слоя, при этом остаётся недозаклад - технологическое пространство высотой не менее 3-4 м для размещения бурового оборудования и обеспечения проветривания очистного забоя.



Применяется при выемке средненарушенной руды, позволяющей поддерживать обнажения шириной 6-8 м без крепления 20-30 суток. На участках, где в нижней части залегают слабо- или средненарушенные руды, а в верхней – сильнонарушенные, допускается сильнонарушенные руды обрабатывать нисходящим порядком выемки, а слабо- и средненарушенные – восходящими слоями в защищенной зоне.

ВЫБОР СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ

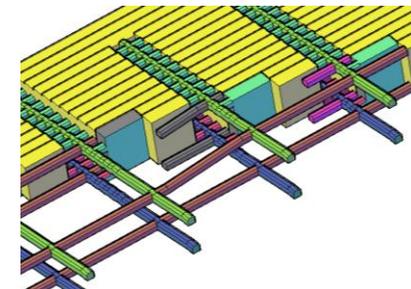
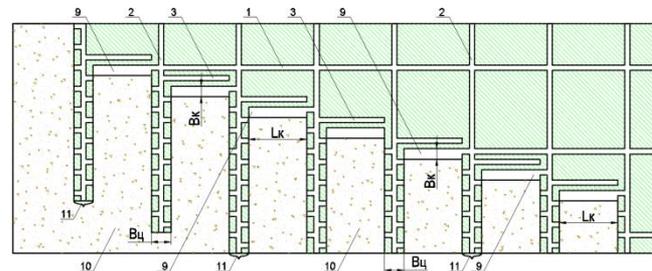
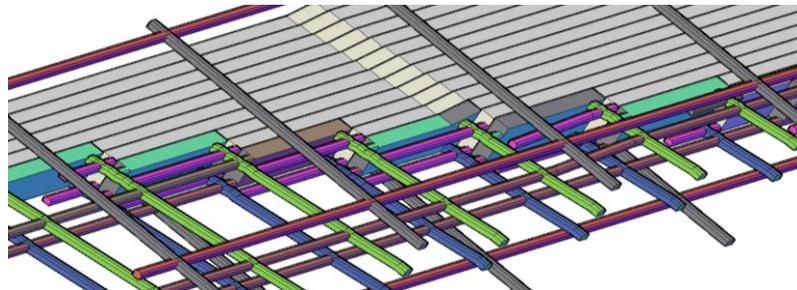
Сплошная камерная система с закладкой (ССС-ду)

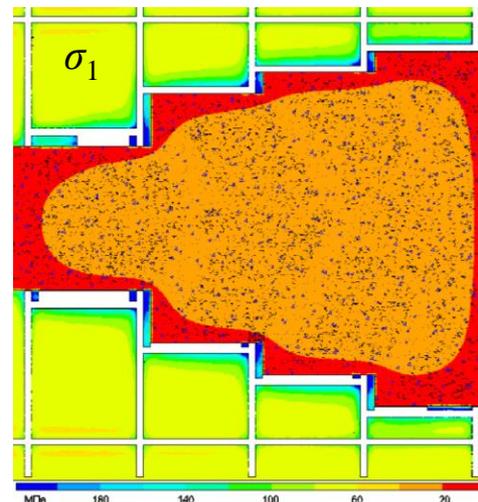
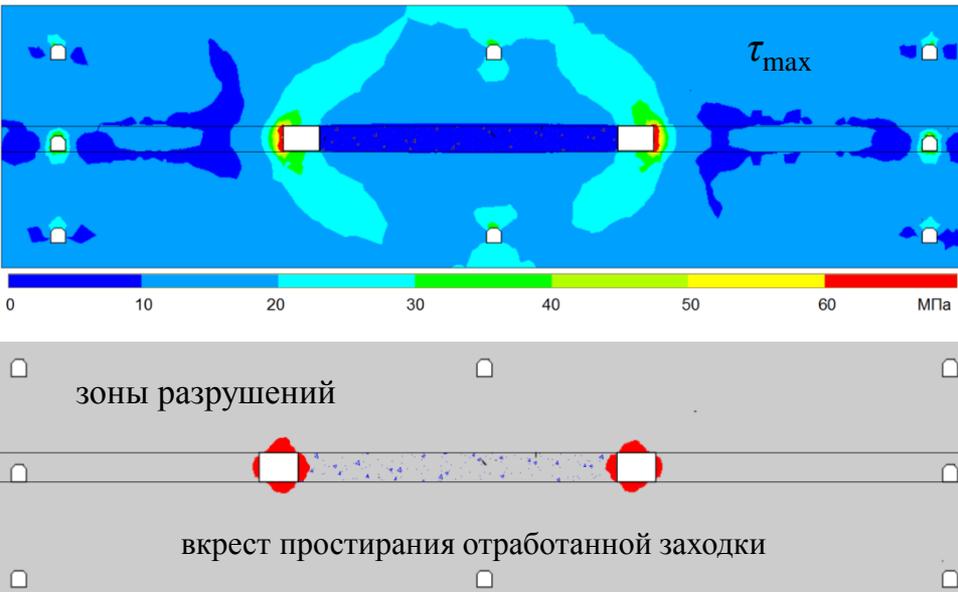


Значительная изменчивость мощности и степени нарушенности рудных залежей обусловила необходимость рассмотрения **сплошной камерной** системы с закладкой

Сущность. Рудная залежь разбивается на панели шириной 60-120 м и камеры шириной 8 м. Нарезка камер заключается в проведении по почве рудного тела из слоевых ортов буро-доставочных, а по кровле – вентиляционных штреков. Отбойка руды производится восходящими или нисходящими веерами скважин.

Обоснование выполнялось для условий: глубина – $H = 1800$ м; ширина камер – $B_k = 8,0$ м; длина камер – $L_k = 30-60$ м; высота камер – $h_k = 20,0; 25,0$ м; мощность рудного тела – $m = 20,0; 25,0$ м.



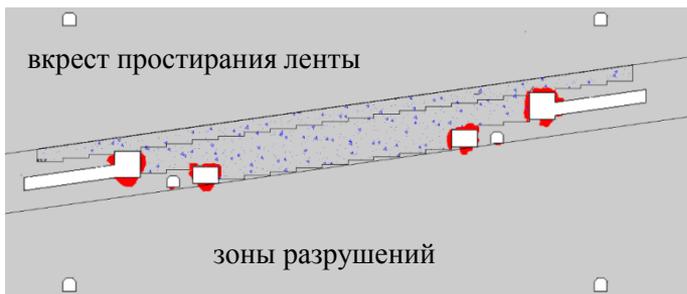
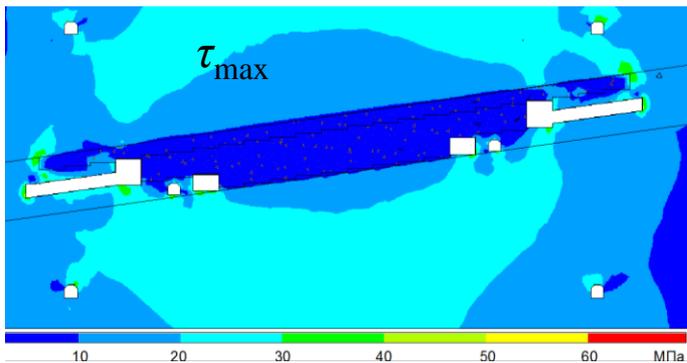


по доставочному горизонту

Характер распределения напряжений при мощности залежи до 7,0 м идентичен варианту при $m=4,0$ м. Основное отличие - более обширные участки потери устойчивости горных пород в кровле, почве и боку очистной заходки. Применение системы ССС-т на залежах мощностью 4,0-7,0 м в условиях сильнонарушенных пород ($K_c=0,2-0,3$) **не рекомендуется**. Возможность безопасного исполнения представленной системы разработки будет определяться массивом пород не ниже средней степени нарушенности с обязательным креплением кровли, при этом мощность залежи должна быть не более 7,0 м.

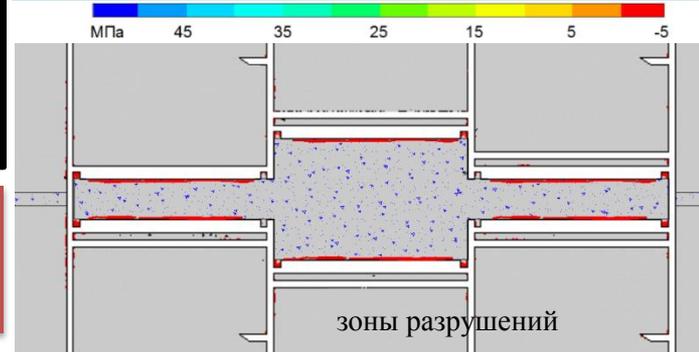
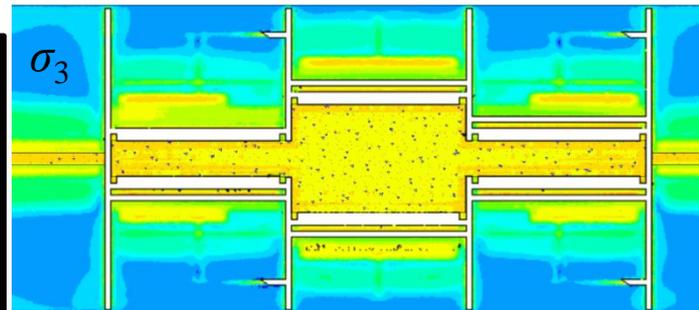
ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СПЛОШНОЙ СЛОЕВОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С НИСХОДЯЩИМ ПОРЯДКОМ ВЫЕМКИ СЛОЕВ (ССС-Н)

15



Потенциально опасные участки - краевая призабойная область защитного слоя, бока сопряжений разрезных штреков со слоевыми ортами, рудные целики, формируемые в кровле залежи между контуром защитного слоя и уклоном при подходе очистного фронта к границам панели.

Закладочный массив, как и защитный слой, испытывает состояние объемного сжатия.



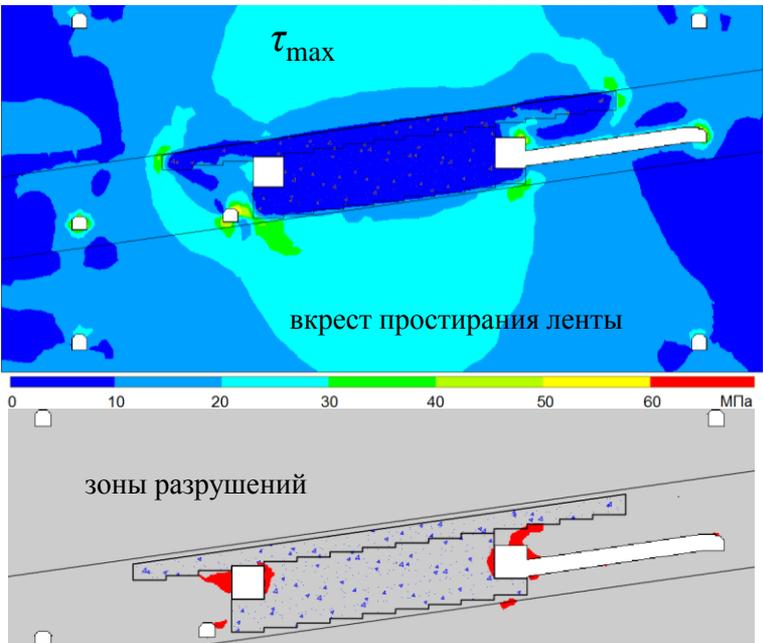
В условиях больших глубин и повышенной нарушенности горных пород система ССС-н по сути является единственной технологией, позволяющей в процессе выемки безопасно контролировать и управлять горным давлением на месторождении.

В подготовительных выработках явно выраженных областей потерь устойчивости пород **не наблюдается.**

Рекомендуемые параметры – $B_3 = 8,0$ м;
 $L_3 = 108$ м; $h_3 = 5,0$ и $8,0$ м

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СПЛОШНОЙ СЛОЕВОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПОРЯДКОМ ВЫЕМКИ СЛОЕВ (ССС-К)

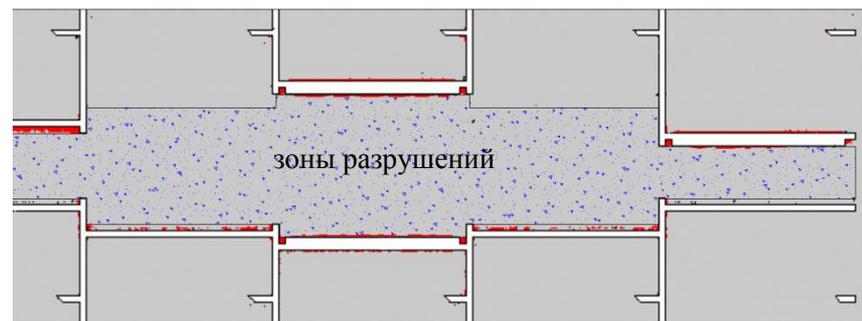
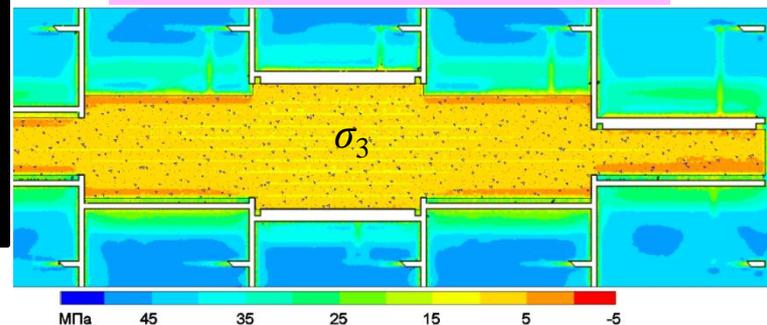
16



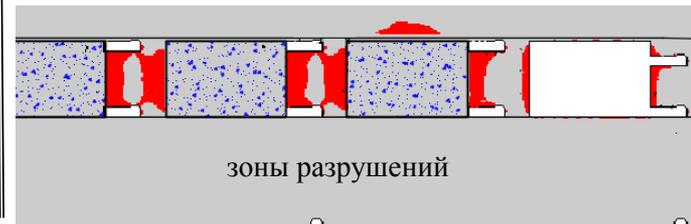
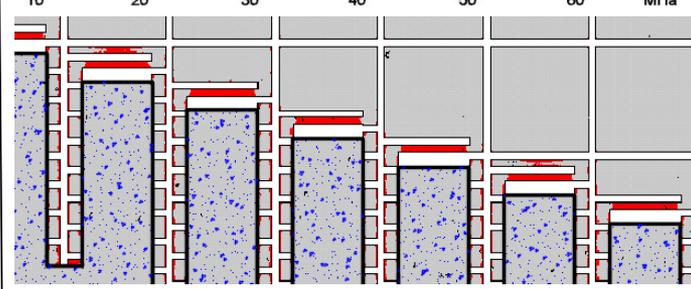
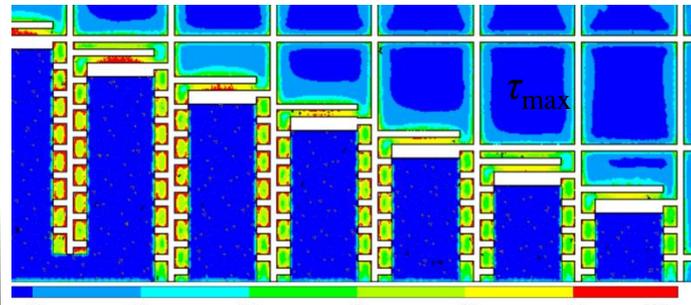
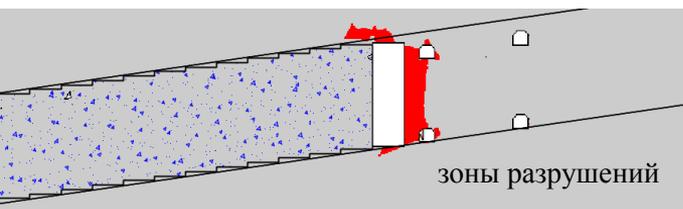
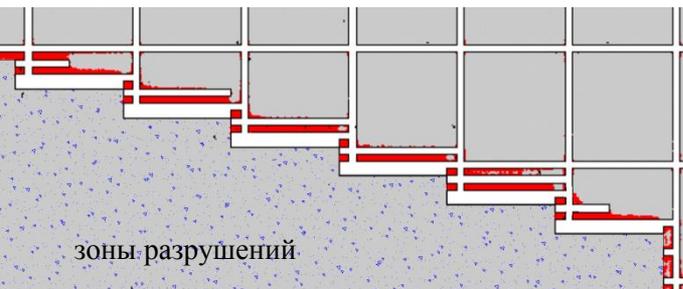
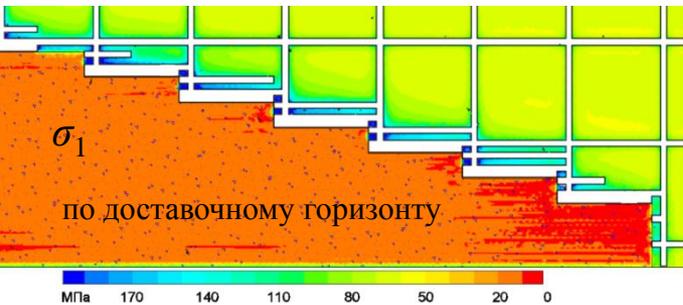
Наличие в кровле и боках (с рудной стороны) очистных заходок переходящих зон от сжатия к растяжению (σ_3 изменяется от 3,0 до "минус" 1,0 МПа) является **неблагоприятным фактором** с позиции устойчивости руды.

Потенциально опасные участки — рудная кровля и бока очистной заходки.

по доставочному горизонту



Система ССС-к применительно к большим глубинам **не рекомендуется** к использованию в рудах с нарушенностью ниже средней и более ($K_c < 0,3$). Безопасным условием ее **применения** являются руды со средней и слабой нарушенностью — $K_c > 0,3$ с параметрами конструктивных элементов не более: $V_3 = 8,0$ м, $L_3 = 108,0$ м, $h_3 = 8,0$ м.



На основании проведенных исследований по оценке устойчивости массива пород в конструктивных элементах технологии СССР-ду в варианте с оставлением временных междукамерных рудных целиков в зависимости от их ширины ($B_{ц} = 15,0-20,0$ м) при $B_{к} = 8,0$ м, $L_{к} = 40$ м, $h_{к} = m = 20,0-25,0$ м установлена недопустимость применения системы разработки для отработки глубокозалегающих северных рудных залежей в условиях ниже средней и сильной степени нарушенности рудопородного массива.

Сочетание действующих главных напряжений во временных междукамерных целиках, в районе сопряжений слоевых ортов с буро-доставочными штреками, в рудных целиках между открытой камерой и разрезным штреком, а также в выработках доставочного и вентиляционного горизонтов в границах временного междукамерного целика, свидетельствуют о запредельном состоянии пород.

1. Сплошная слоевая система разработки с выемкой тупиковыми заходками (ССС-т) в условиях ниже средней и сильной степени нарушенности массива пород: ширина очистной заходки – $B_3 < 4,0-6,0$ м; длина очистной заходки – $L_3 < 30,0-60,0$ м; мощность рудного тела – $m < 4,0$ м; обязательное крепление кровли очистных заходов в зависимости от нарушенности массива различными видами крепей; вариант отработки очистной заходки путем расширения разрезного штрека **неприемлем** в рассматриваемых условиях больших глубин.

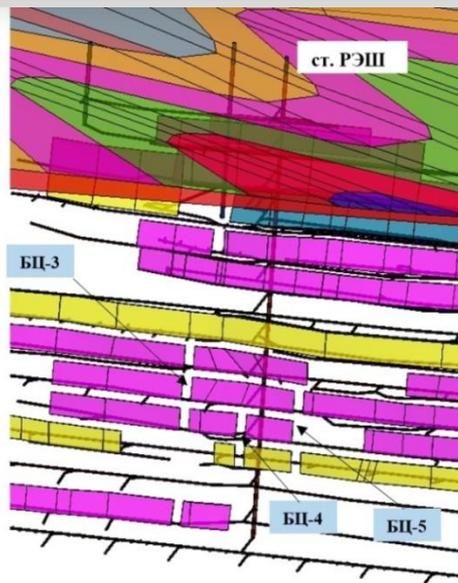
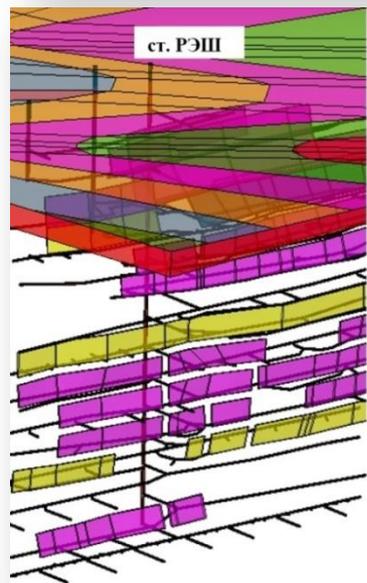
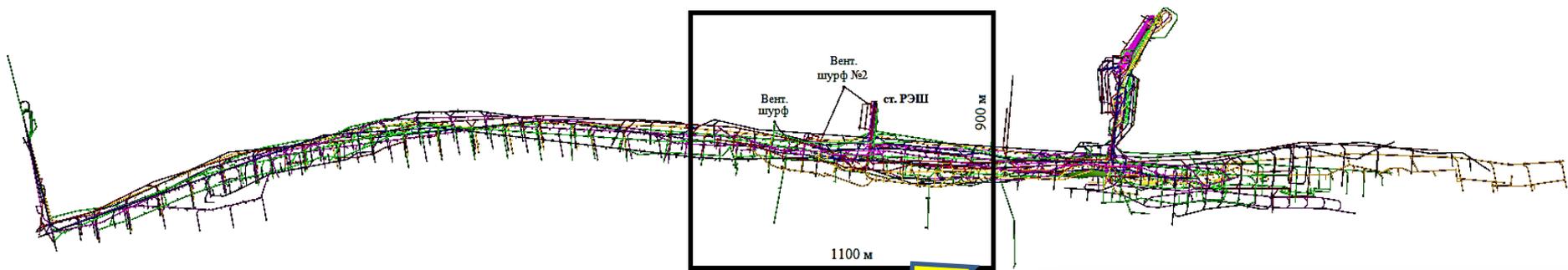
2. Сплошная слоевая система разработки с нисходящим порядком выемки слоев (ССС-н) в условиях ниже средней и сильной степени нарушенности массива пород: ширина очистной заходки (слоя) – $B_3 < 6,0-8,0$ м; длина очистной заходки (слоя) – $L_3 < 108,0$ м; высота очистной заходки (слоя) – $h_3 < 6,0-8,0$ м; нормативная прочность закладки не менее 6,0-8,0 МПа.

3. Сплошная слоевая система разработки с комбинированным порядком выемки слоев (ССС-к) в условиях ниже средней и сильной степени нарушенности массива пород при $K_c < 0,3$ **не рекомендуется** к применению.

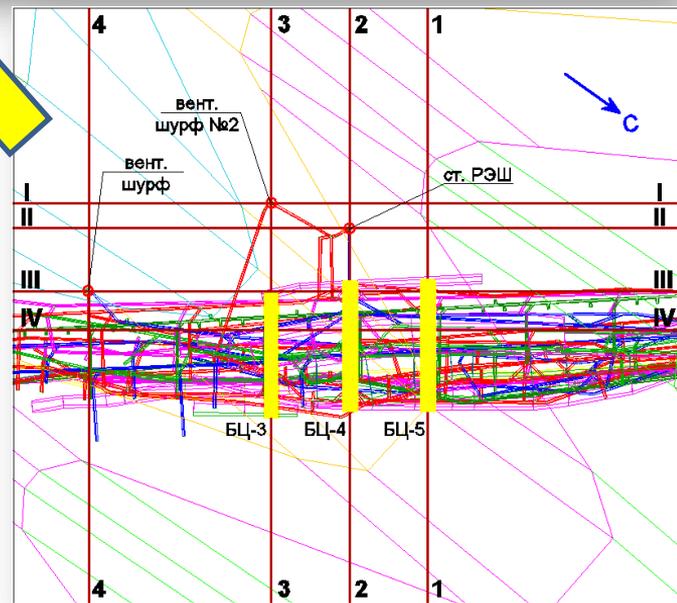
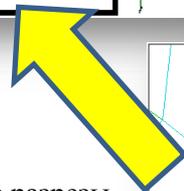
4. Сплошная камерная система разработки с закладкой выработанного пространства и использованием дистанционного управления самоходным оборудованием (ССС-ду) в условиях средней, ниже средней и сильной степени нарушенности массива пород при $K_c < 0,3$ **не рекомендуется** к применению.

На основе выполненных исследований **УСТАНОВЛЕНО**, что для отработки глубокозалегающих северных залежей наиболее безопасной, отвечающей всей совокупности горно-геологических и геомеханических условий, имеющих место быть на Октябрьском месторождении, является **сплошная слоевая система разработки с нисходящим порядком выемки слоев.**

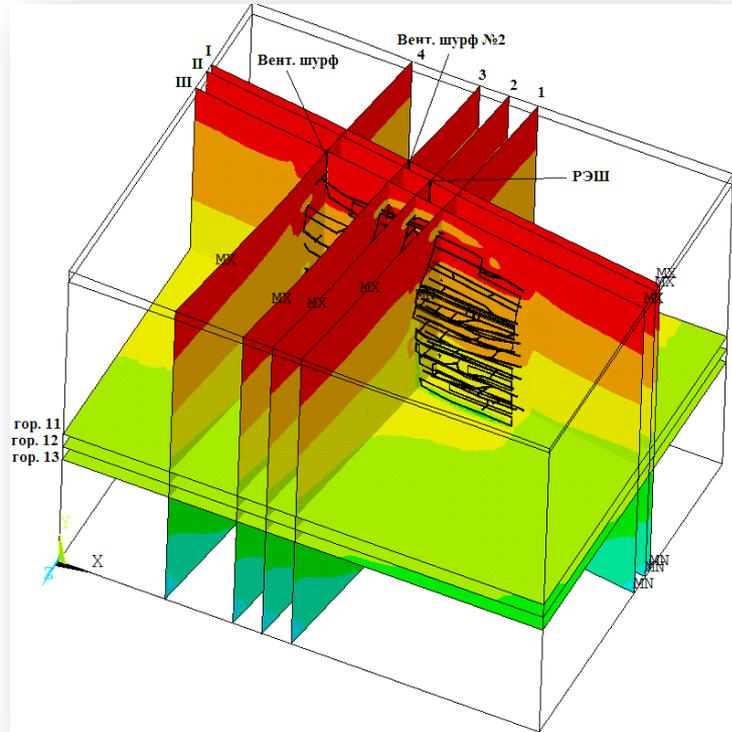
Разработка геометрической физико-механической модели месторождения в области влияния вертикального ствола рэш



Анализируемые разрезы геомеханической модели в вертикальной плоскости при оценке влияния развития горных работ и отработки барьерных целиков на состояние земной поверхности, ствола "РЭШ" и капитальных выработок откаточных горизонтов

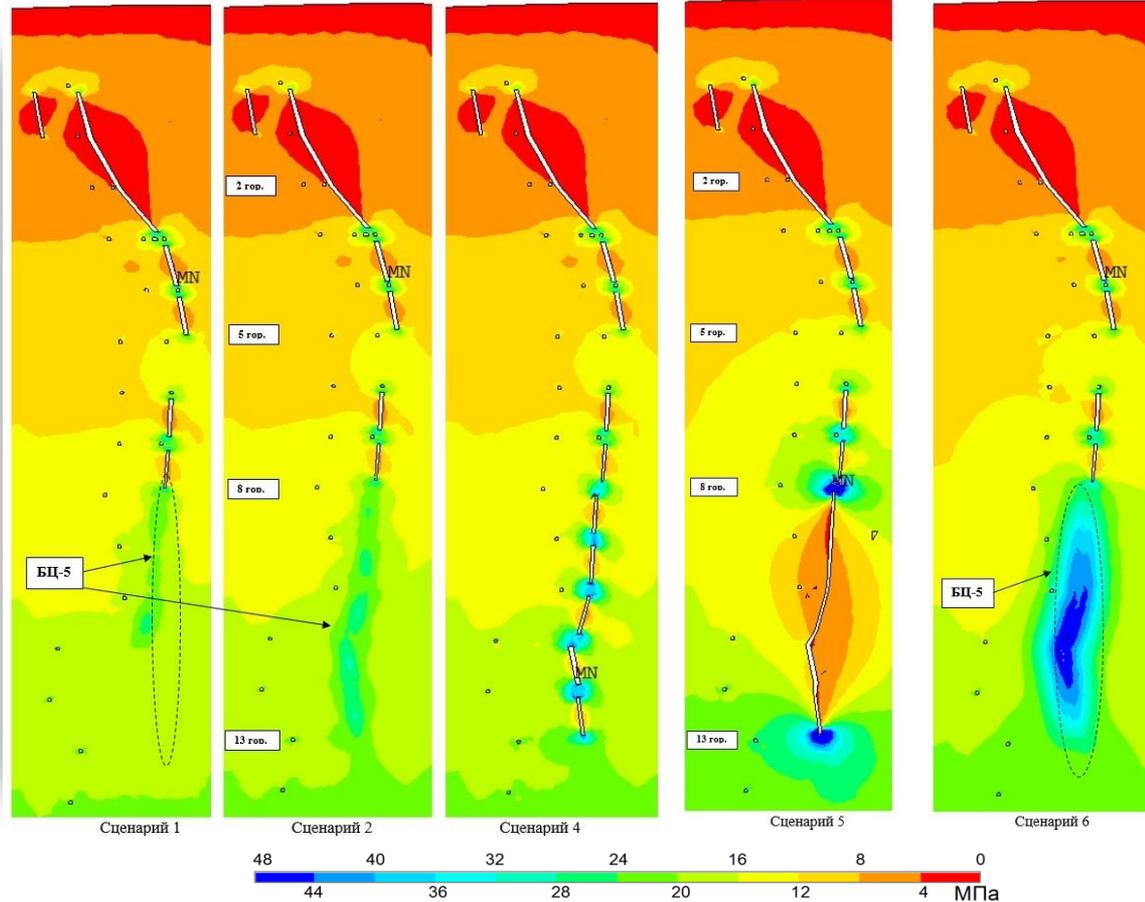


Геомеханическая модель моделируемой горнотехнической ситуации

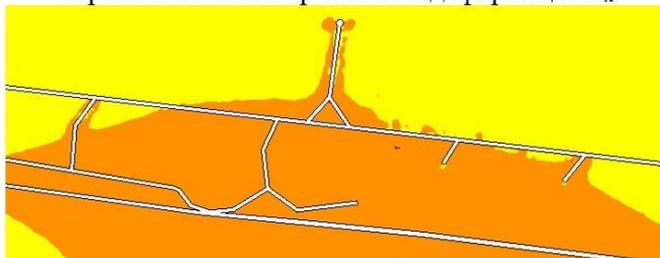


Максимальные главные напряжения σ_1 , МПа

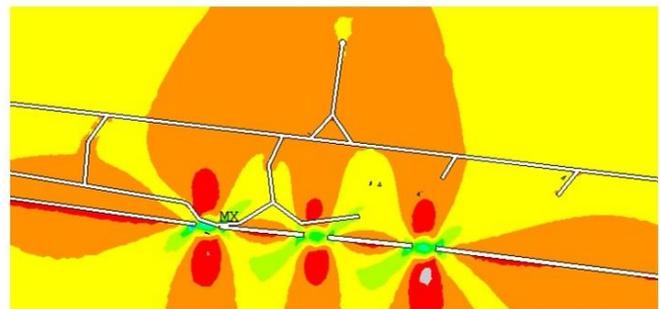
по разрезу 1



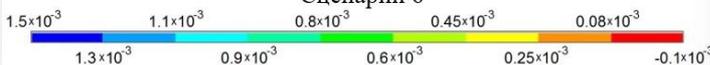
Горизонтальные нормальные деформации ϵ_x



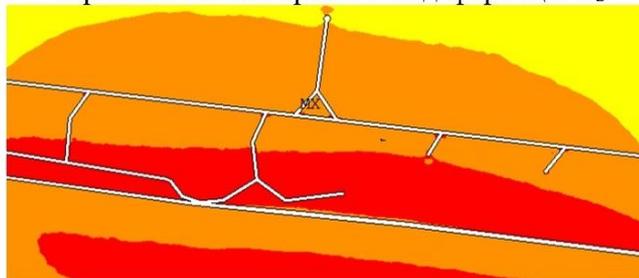
Сценарий 5



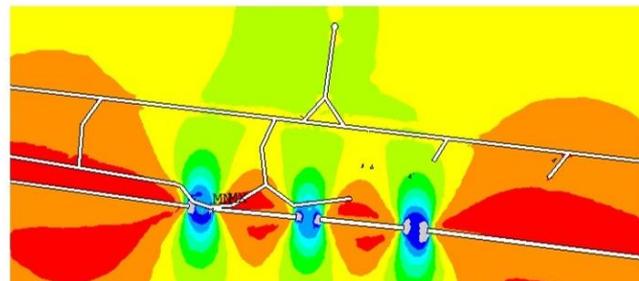
Сценарий 6



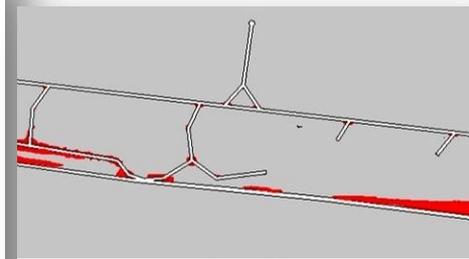
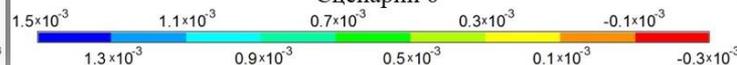
Горизонтальные нормальные деформации ϵ_z



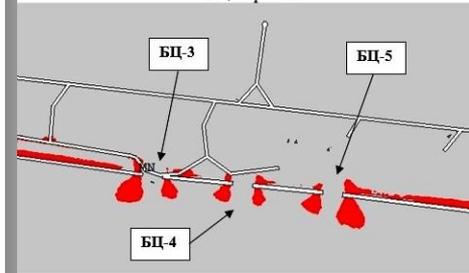
Сценарий 5



Сценарий 6



Сценарий 5



Сценарий 6

Отработка запасов в контуре предохранительного целика ствола РЭШ с погашением выработанного пространства обрушением пород лежачего и висячего боков залежи (использование технологий без закладки) не вызывает опасных деформаций подрабатываемых объектов на земной поверхности. Обусловлено это незначительной мощностью рудной залежи ($m_{cp} \approx 2,0-4,0$ м). Для обеспечения безопасной эксплуатации шахтного ствола РЭШ при погашении запасов предохранительного целика необходимо на первоначальном этапе предусмотреть оставления целиков БЦ как временно неактивных, с возможностью последующего их погашения при обязательном выполнении постоянного геомеханического мониторинга.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

