

АНАЛИЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ ТРУБКИ «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНАЯ»

к.т.н. Барышников В.Д., к.т.н. Болтенгаген И.Л., д.т.н. Крамсков Н.П.* , Черепнов А.Н.**

Институт горного дела СО РАН г. Новосибирск, Россия

**Институт «Якутнипроалмаз, г. Якутск, Россия*

***АК «АПРОСА», г. Якутск, Россия*

АННОТАЦИЯ: Методом конечных элементов по упругой модели кусочно-однородной слоистой толщи вмещающих пород трубки в осесимметричной постановке получены прогнозные оценки величин смещений, деформаций и напряжений массива горных пород вокруг подземных выработанных пространств и карьера для последовательных этапов разработки месторождения. Выполнен геомеханический анализ влияния открытых и подземных горных работ на напряженно-деформированное состояние массива в окрестности стволов, в переходной зоне и в предохранительном целике под Метегеро-ичерским водоносным комплексом.

Введение

Актуальность задачи связана с обеспечением безопасности горных работ при подземной добыче алмазов месторождений Якутии. Кимберлитовые трубки являются вертикальными рудными телами овального поперечного сечения. Наличие 200-метровой толщи Метегеро - ичерского водоносного комплекса во вмещающих породах (мергели, доломиты, известняки) является одним из основных факторов, определяющих способы добычи полезных ископаемых Малоботуобинского месторождения алмазов вблизи города Мирный (трубки «Мир» и «Интернациональная»). Главным образом по этой причине в 1999г подземная разработка опытно-промышленного блока №6 на руднике «Интернациональный» начата не непосредственно под дном карьера глубиной 285м, а гораздо ниже на глубине около 700-800м под защитой предохранительного целика. Блок №6 высотой 95м был разделен на три подэтажа, выемка которых осуществлялась слоевой системой разработки с применением твердеющей закладки [1]. Горизонтальные слои высотой 3.5-5м отрабатывались с применением проходческого комбайна по камерно целиковой схеме заходками шириной около 5 м. Основной объем запасов в блоке отработан слоями в восходящем порядке без применения крепления и с размещением разрезных слоевых ортов в рудном массиве. По условиям устойчивости очистных заходок, два смежных слоя в зонах стыковки подэтажей были отработаны в нисходящем порядке. В 2004 г на руднике «Интернациональный» завершена отработка опытно-промышленного блока №6 и начаты очистные работы в блоке №5 высотой также 95м, расположенном непосредственно над блоком №6. Начальный опыт отработки блока №5 показал, что геомеханические условия ведения горных работ в нем существенно отличаются от условий разработки №6. Это обусловлено разными видами вмещающих пород: запасы блока №6 размещены в доломитах, а блок №5 находится в соляных породах. Из-за невозможности обеспечения устойчивости очистных заходок и слоевых разрезных ортов без применения крепления, выемка слоев выполнялась в нисходящем порядке, а разрезные орты при отработке подсечных слоев размещались во вмещающих породах и использовались в последующем в качестве закладочных выработок. В 2005 г на руднике «Интернациональный» отрабатывались запасы блока №5 и межэтажных целиков (МЭЦ) между блоками 6 - 7 и 5 - 6. Начаты работы по реконструкции бортов карьера с целью осушения карьера и последующей открытой отработки части подкарьерных запасов ниже отметки существующего дна карьера (а.о. +116 м) до отметки кровли водоносного горизонта (а.о. +170 м) при одновременном ведении подземной разработки. В пределах шахтного поля трубки «Интернациональная» наиболее ответственным участком является толща под дном карьера до

отметок 5 блока. Величины и характер действующих здесь напряжений определяется не только исходным состоянием и свойствами нетронутого массива, но и параметрами карьера и отработанных блоков. Геомеханическое состояние этого участка осложняется наличием мощного метегеро-ичерского водоносного комплекса, расположенного в абсолютных отметках +70 м ÷ -130 м. По результатам предварительных исследований рудный массив в переходной зоне характеризуется относительно низкой прочностью, что способствует развитию зон запредельного деформирования, вызванного подземной отработкой блоков ниже границы предохранительного целика. Сдвигение пород в переходной зоне в результате совместного ведения открытой и подземной разработки не должно приводить к образованию магистральных трещин в рудном массиве и во вмещающих породах, резко увеличивающих водопритоки в горные выработки и создающих угрозу затопления рудника. В данных условиях необходимы знания особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) подкарьерной толщи, а также инструментальный контроль процесса сдвижения рудного массива и вмещающих горных пород на различных этапах отработки. Выбор методов, измерительных средств и условий размещения наблюдательных станций системы гидрогеомеханического мониторинга базируется на прогнозных оценках ожидаемых параметров процесса сдвижений и деформаций в подкарьерной толще пород.

Цель работы - оценка и анализ изменений напряженно-деформированного состояния подкарьерной рудной толщи и вмещающих пород,

Идея работы заключается в математическом моделировании механического состояния массива горных пород в различных горнотехнических ситуациях, соответствующих современному и планируемому состоянию горных работ на руднике.

Задачи исследований:

1. Обосновать геомеханическую модель месторождения на глубинах от поверхности до нижней отметки отработанного подкарьерного пространства.

2. Выполнить оценку параметров НДС массива горных пород вокруг карьера с учетом его углубки, включая предварительную оценку (без учета отпора крепи) влияния карьерного пространства на состояние вертикальных стволов рудника.

3. Определить зоны концентрации напряжений и параметры процесса сдвижения рудного массива и вмещающих горных пород; дать оценку области влияния карьера и отработанных подземных пространств.

4. Полученную в результате выполненных исследований информацию использовать в качестве основы для последующей организации гидрогеомеханического мониторинга состояния подкарьерной толщи горных пород.

Метод исследования – компьютерное моделирование геомеханических условий разработки месторождения методом конечных элементов и теоретический анализ полученных результатов.

Основные особенности геомеханической модели заключаются в следующем.

1. Предположение об осесимметричном напряженном состоянии массива горных пород, основанное на результатах экспериментальных исследований исходного (начального) напряженного состояния и на особенностях геологического строения массива горных пород (горизонтальные слои осадочных пород и цилиндрическая форма рудного тела), позволило использовать двумерную постановку задач механики деформируемого твердого тела.

2. Применялась упругая модель деформирования неоднородного слоистого массива вмещающих пород.

3. Учитывались особенности деформирования искусственных массивов в выработанных пространствах, связанные с различием предварительно напряженных состояний горных пород и закладки.

4. Возможные разрушения оценивались по критерию Кулона-Мора.

Достоверность научных результатов и рекомендаций обеспечивается обоснованием используемой геомеханической модели объекта и сопоставлением прогнозных теоретических оценок с опытными данными.

Практическая ценность научных результатов заключается в рекомендациях по созданию системы гидрогеомеханического мониторинга состояния подкарьерной толщи горных пород.

1. Исходная геологическая и маркшейдерская информация *

Положение подземных и открытых горных работ на едином вертикальном поперечном разрезе (запад-восток) рудника иллюстрирует рис.1. Горизонтальными линиями показан Метегеро-ичерский водоносный горизонт и нанесены стратиграфические границы свит.

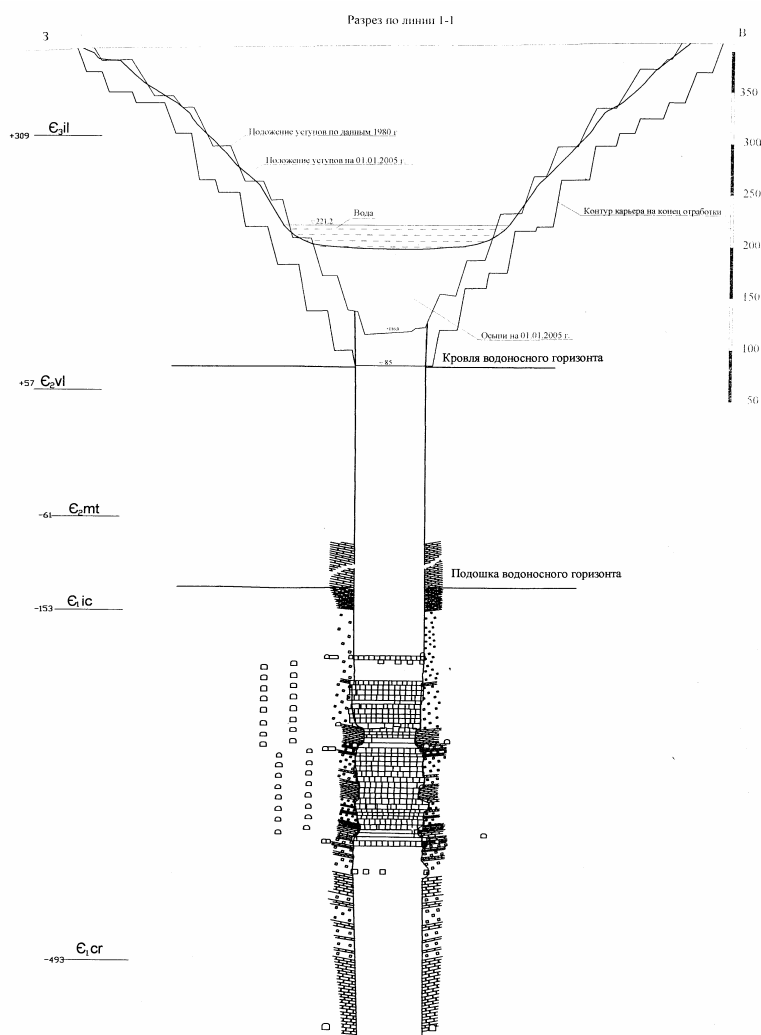


Рис.1. Разрез (запад-восток) вмещающей толщи пород рудника «Интернациональный».

Месторождение находится в центре одной из самых древних геологических платформ Земли - Сибирской платформе, занимающей территорию Восточной Сибири между Енисеем (на западе) и Леной (на востоке) и между побережьем Моря Лаптевых в Северном Ледовитом Океане (на севере) и Байкальской зоной современного горообразования (на юге). Массив вмещающих скальных пород трубок «Мир» и «Интернациональная» Мало - Ботуобинского района сформирован в основном осадочными карбонатными породами кембрия 500-570 млн. лет назад в период появления на суше первых споровых растений, а в морях – примитивных беспозвоночных, таких как трилобиты и кольчатые черви. Исключение составляет приповерхностный слой пород нижнего ордовика мощностью менее 100 м (Усть-Кутская свита *O_{1us}*). Верхний кембрий

* Геологическая и маркшейдерская документация предоставлена Институтом «Якутнипроалмаз» и геологической службой Мирнинского ГОКа АК АЛРОСА.

представлен Илгинской свитой E_{3il} , средний кембрий – Верхоленской E_{2vl} и Метегерской E_{2mt} свитами, нижний-средний кембрий – Ичерской свитой $E_{1/2i\check{c}}$, нижний кембрий - Чарской $E_{1\check{c}r}$, Олекминской E_{1ol} и Толбачанской E_{1tb} свитами.

Усть-кутская свита ордовика O_{1us} мощностью 17м сформирована обломочными горными породами (песчаниками на известковом цементе).

Кембрийские свиты сложены осадочными породами химического и органического происхождения: карбонатными породами (известняки, доломиты, мергели), а также сульфатными и галоидными породами (ангидрит, гипс, каменная соль).

Илгинская свита E_{3il} мощностью 174м - слои доломита и мергеля с примесью в центральной части ангидритов.

Верхоленская свита E_{2vl} мощностью 152м - слои доломита и сильно огипсованных мергелей.

Метегерская свита E_{2mt} мощностью 118м сложена в верхней части слоями трещиноватых и слаботрещиноватых мергелей, в нижней – слоями доломита с примесями гипса, ангидритов, битума.

Ичерская свита $E_{1/2i\check{c}}$ мощностью 92м – слои битуминозных известняков и доломитов с гипсом.

Чарская свита $E_{1\check{c}r}$ мощностью 340м сформирована переслаивающимися соляными породами в последовательности (сверху вниз) каменная соль, доломит - ангидриты, известняки. Данное строение соответствует последовательности выпадения веществ из раствора, установленной итальянским ученым Усиглио в середине 19 века в опытах по выпариванию морской воды. Сначала из раствора выпадают труднорастворимые вещества, затем все более легко растворимые вещества: сначала – карбонаты, потом сульфаты, затем хлориды. Доломиты, являющиеся смесью молекул карбонатов кальция и магния, имеют меньший вес моля, чем известняки (карбонат кальция). Атомные веса: Mg - 24.3 и Ca – 40.1. Отметим также, что вес даже пары атомов $NaCl$, составляющих основу ионной кристаллической структуры галита, (58.5) меньше веса моля карбоната кальция $CaCO_3$ (101), карбоната магния $MgCO_3$ (84.3) и сульфата кальция (ангидрита) $CaSO_4$ (136). Растворимость и последовательность выпадения веществ из морской воды соответствует их молярному весу. Анализ строения Чарской свиты позволяет высказать следующую гипотезу ее происхождения. Переслаивающиеся соляные породы образованы в результате нескольких покрытий (порядка 10) поверхности суши морем и последующих испарений толщи морской воды. Наличие битума и нефти в трещинах пластов известняка и соли свидетельствует о теплом климате на территории Сибирской платформы в то время.

Олекминская свита E_{1ol} мощностью 180м - слои доломита и известняка.

Толбачанская свита E_{1tb} мощностью 178м (до глубины 1250м) слои доломитов и каменной соли.

Метегеро-ичерский водоносный горизонт расположен в границах одноименных Метегерской и Ичерской свит. Верхняя граница водоносного горизонта находится рядом с поверхностью подошвы многолетнемерзлых пород. Нижняя граница водоносного горизонта находится на границе переслаивающихся соляных пород Чарской свиты и слоев глинистых битуминозных доломитов Ичерской свиты. Водяными коллекторами являются контакты слоев доломитов, мергелей и известняков Метегерской и Ичерской свит (порядка 10). Данные скальные породы являются относительно водонепроницаемыми. Водопроницаемость пород обусловлена тем, что вода просачивается между отдельными зернами по порам или трещинам. Большая пористость (отношение объема пор к полному объему в %) не всегда обеспечивает свободное проникновение воды. Классическим примером являются песок (водопроницаемая порода пористостью 30-35%) и глина (почти водонепроницаемая порода пористостью 50-60%) [2]. Водоупорные свойства глины объясняются очень тонкими порами (субкапилляры), при движении в которых вода испытывает огромное сопротивление, обусловленное поверхностным натяжением. То, что даже почти «непроницаемые» горные породы (мергель, мергелистые глины и глины, плитчатые сланцы) проводят по трещинам воду отмечено еще в 1938г немецким ученым Штини

(J.Stini) [3]. Значительную помощь при анализе гидрогеологических условий может оказать монография норвежского ученого Ван Голф-Рахта (Т.Д. Van Golf-Racht), изданная на русском языке в 1986г [4]. Отметим наличие открытых вертикальных трещин в пласте известняка Ичерской свиты мощностью около 40м (а.о.: -65.5м ÷ -106.1м) с кавернами различных размеров (от 0.3-0.5 до 2.5 см, кавернозность пород - 20%); наличие в трещинах глинистого материала свидетельствует о длительности времени межколлекторных протоков в данном пласте. Отметим также вертикальную трещиноватость практически во всех слоях доломитов Метегерской свиты. Водупорным пластом, отделяющим водоносный горизонт от растворимых соляных пород Чарской свиты, являются слаботрещиноватые глинистые, битуминозные доломиты нижних трех слоев Ичерской свиты общей высотой около 47м (а.о.: -106.1м ÷ -153.4м). Наименьшим коэффициентом проницаемости обладает центральный среди них пласт доломита мощностью 22м (а.о.: -114.0м ÷ -136.1м) со слаботрещиноватыми породами, в которых тонкие трещины заполнены гипсом. Представляется наиболее очевидной связь генезиса пород Метегерской и Ичерской свит с вымыванием пластов соли, расположенными когда-то между пластами известняков и доломитов. При ведении подземных горных работ реальную опасность могут представлять вертикальные техногенные трещины в нижних слоях пород Ичерской свиты. Поэтому необходимы оценки величин дополнительных горизонтальных деформаций, способствующих раскрытию имеющихся вертикальных трещин в пластах Метегеро-ичерского водоносного горизонта. Также необходим контроль зоны неупругих деформаций над выработанным пространством, созданным в результате выемки запасов блока №5 рудника. Особым дополнительным объектом наблюдения и исследования является контактная вертикальная (боковая) граница трубки с вмещающими породами в непосредственной близости от 20-го разрезного слоя блока №5 (горизонт -200м).

Трубка «Интернациональная» характеризуется

- овальным горизонтальным поперечным сечением рудного тела; близким к форме круга диаметром около 80м;
- вертикальной цилиндрической формой подземных выработанных пространств;
- горизонтальными контактными границами литологических разностей вмещающей толщи осадочных пород.

2. Деформационные и прочностные свойства руды, пород и закладки

Таблица 1. Прочностные и деформационные свойства образцов горных пород.

№ комплекса	Прочность на сжатие, МПа	Угол трения ⁰	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
1	52.3 (0.10)*	31.3 (0.10)	44.3 (0.15)	0.25
2	35.6 (0.35)	27.2 (0.01)	40.2 (0.30)	0.25
3	13.7 (0.19)	31.3 (0.10)	28.3 (0.12)	0.25
4	27.9 (0.40)	34.5 (0.05)	47.3 (0.20)	0.35
5	15.4 (0.29)	36.4 (0.02)	20.4 (0.33)	0.20
6	55.3 (0.29)	36.8 (0.08)	67.0 (0.12)	0.25

*В скобках – коэффициент вариации (отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению величины). Абсолютная погрешность измерений, оцениваемая величиной среднеквадратичного отклонения, соответствует 68% доверительному интервалу (ширина интервала равна удвоенному среднеквадратичному отклонению).

Расчеты деформационных свойств массивов скальных пород Мало-Ботуобинского района выполнены сотрудниками лаборатории геомеханики института Якутнипроалмаз в 1985-1986гг (руководитель работ Н.К.Звонарев, ответственный исполнитель А.И.Коробка). Подготовлены рекомендации для построения инженерно-геологической модели рудников «Интернациональный» и «Мир» [5]. Количественным анализом результатов испытаний образцов пород (табл.1), трещиноватости массива и данных о гидрогеологических условиях были получены осредненные свойства массивов вмещающих горных пород, сведенных в шесть инженерно-геологических

комплексов. Границы комплексов близки к контактными поверхностям свит. Деформационные свойства пород инженерно- геологических комплексов приведены в таблице 2. Результаты исследований в большей степени основывались на обширных данных о свойствах пород на руднике «Мир». Для геомеханических расчетов в данной работе использовались значения модулей упругости табл.2. Границы горно-геологических комплексов предполагались соответствующими поверхностям раздела свит. Коэффициент Пуассона массивов горных пород предполагался равным значениям, полученным для образцов породы в лабораторных опытах (табл.1).

Таблица 2. Прочностные и деформационные свойства массива горных пород.

№ комплекса	Глубина залегания комплекса, м	Модуль деформации, ГПа	Прочность на сжатие, МПа	Предельная деформация пород, % ^{***}
1	0-191 (191) ^{**}	10	5.5	0.75
2	191-343 (152)	8	4.2	0.80
3	343-461 (118)	5	2.0	0.80
4	461-553(92)	12	20.0	2.0
5	553-893 (340)	10	6.0	0.50
6	893-1072 (180)	25	12.0	0.60
7 [*]	1072-4000(178)	25	12.0	0.60

* В предварительных исследованиях [5] выделялись 7 инженерно-геологических комплексов (породы Усть-Кутской и Илгинской свит объединялись в единый комплекс, породы Олекминской и Толбачанской свит разделялись в отдельные комплексы). На заключительном этапе исследований породы последних свит были объединены в единый комплекс 6. В использованной модели контактная граница свит сохранена для возможности дальнейшей корректировки параметров модели.

** В скобках приведена мощность комплекса пород. В комплексе 7 – мощность Толбачанской свиты (до глубины 1250м). Для пород на глубинах свыше 1250м значение модуля упругости массива горных пород полагалось равным модулю упругости пород Толбачанской свиты. Абсолютная отметка земной поверхности +400м.

*** Символ ‰ (промилле) обозначает одну тысячную (10^{-3}) и удобен для обозначения критических (предельных) величин деформации массива горных пород, при которых формируются техногенные трещины.

Отметим, что прогноз величин напряжений (как полных, так и дополнительных) практически не зависит от значений деформационных свойств. Распределение напряжений вокруг выработанных пространств в большей степени определяется их геометрическими параметрами и начальными (исходными) напряжениями. Данное обстоятельство становится понятным после следующего пояснения. Создание карьера и подземных полостей в механике деформируемого твердого тела эквивалентно снятию (полному в случае незакрепленных выработок или частичному в случае заполненных закладкой выработанных пространств) поверхностной нагрузки на формируемых контурах полостей. Векторы снимаемых поверхностных усилий и результат этого воздействия на массив горных пород определяются геометрическими параметрами формируемых поверхностей выработок и начальными напряжениями. В частности при наличии массовых (гравитационных) сил создание выреза вблизи *свободной поверхности*^{*} деформируемого твердого

* *Свободной от напряжений поверхностью* (или кратко *свободной поверхностью*) называется поверхность, на которой вектор поверхностных усилий равен нулю. Такими поверхностями, прежде всего, являются поверхности выработок. Равенство нулю вектора поверхностного усилия является следствием первого закона Ньютона. В статике элемент поверхности малой глубины находится в состоянии покоя, поэтому равна нулю сила, действующая на него. Из-за малой глубины анализируемого элемента массива (приповерхностного слоя пород) величиной сил, обусловленных напряжениями на его поверхностях, которые перпендикулярны контуру выработки, можно пренебречь. На торцевой поверхности элемента, являющейся частью контура выработки, нормальные и касательные напряжения равны нулю (атмосферным давлением воздуха можно пренебречь). Следовательно, равен нулю и вектор поверхностных усилий. Отметим, что равенство нулю вектора поверхностных усилий на свободной поверхности не значит равенства нулю всех компонент тензора напряжений в элементе приповерхностного слоя пород. Ненулевыми в данном случае являются нормальные и сдвиговые компоненты напряжений, действующие на поверхностях рассматриваемого элемента слоя, перпендикулярных контуру выработки, которые и создают так называемую концентрацию напряжений вокруг выработок. Напряжения в элементе массива в данном случае соответствуют *плоскому напряженному состоянию*.

тела эквивалентно снятию нагрузки на формируемом контуре карьера. Главный вектор поверхностных усилий^{**}, снимаемых на контуре карьера, направлен вверх. Данный факт является таким же очевидным, как и приложение поверхностной нагрузки, направленной вглубь недр, при создании сооружения на земной поверхности.

В отличие от напряжений, величины смещений и деформаций пропорциональны модулю упругости и их расчетные значения полностью определяются деформационными свойствами пород. Уточнение модулей упругости массивов горных пород выполняется путем сопоставления прогнозных (расчетных) значений смещений и деформаций с результатами измерений и наблюдений в шахтных условиях и на земной поверхности вокруг выработанных пространств. В качестве примера приведем некоторые результаты применения компьютерного моделирования для анализа геомеханических условий. На рудниках «Октябрьский» и «Комсомольский» Талнаха (выработанные пространства высотой около 30м, шириной 100-500м и протяженностью около 1км заполнены твердеющей закладкой) модули упругости образцов и массива горных пород различались в 2-3 раза [6,7]. Выполнялось сопоставление результатов компьютерного моделирования методом конечных элементов с данными долговременных наблюдений^{***} за смещениями подработанных пород. При выемке залежей вблизи земной поверхности с помощью вариантов систем с обрушением вмещающих пород значение модуля деформации массива вокруг выработанных пространств может более чем на порядок отличаться от величины, полученной на образцах.

Модуль упругости кимберлита по различным оценкам находится в интервале значений от 2ГПа до 40ГПа. В данной работе *рудный массив* моделировался упругим материалом с модулем упругости 10 ГПа и коэффициентом Пуассона 0.3. Искусственный *закладочный массив*, заполняющий выработанные пространства блоков №5-8 рудника моделировался материалом с модулем упругости 500 МПа, коэффициентом Пуассона 0.25 и удельным весом 20 КН/м³.

3. Конечно-элементная модель объекта

Исходное напряженное состояние по результатам экспериментальных исследований на горизонтах блоков №6-7 рудника имеет следующие основные особенности. Горизонтальные (тектонические) компоненты напряжений равны друг другу (различие не превышает 15-20%). В пластах доломита величина отношения горизонтальной и вертикальной компонент начальных напряжений (коэффициент бокового отпора) находится в интервалах значений от 0.6 до 0.8. В пластах каменной соли коэффициент бокового отпора близок к 1 [8]. Для верхних оценок величин деформаций предохранительного целика и массива горных пород вокруг стволов рудника, в моделировании применялось начальное гидростатическое напряженное состояние массива горных пород: горизонтальные исходные напряжений равны вертикальной компоненте, обусловленной весом налегающей толщи пород.

Геометрические параметры расчетной области вокруг трубки иллюстрируются рис.2. Показаны конфигурации карьера до и после реконструкции, отработанные блоки №5-6, планируемые к выемке блоки №7-8 и блок №1 на дне карьера; отмечены так же контактные границы вмещающих пород (арабские цифры – номер инженерно- геологического комплекса) и рудного тела; пунктирными горизонтальными линиями показаны границы переходной зоны в Метегеро - ичерском водоносном комплексе (а.о. +85 и -200м), а также дренажный горизонт (а.о. - 145м); пунктирными вертикальными линиями показано примерное расположение клетового (кс) и скипового (сс) стволов, расположенных на расстояниях 540 и 580м от центральной вертикальной оси трубки, соответственно. Методом компьютерного моделирования выполнена геомеханическая оценка влияния подземных (выемка запасов блоков №5-№8) и открытых (углубка карьера и выемка запасов блока №1) горных работ на стволы рудника и на напряженно-деформированное

^{**} Вектор (размерности силы), равный интегралу по площади создаваемого выреза от вектора поверхностных усилий (размерности давления).

^{***} Ворошилов И.К. Норильский опорный пункт ВНИМИ, 1977-1990.

состояние (НДС) массива переходной зоны и предохранительного целика. На предварительном этапе исследований выполнен геомеханический анализ исходной горнотехнической ситуации на руднике, соответствующей отработке карьера до проходки вертикальных стволов.

С использованием метода конечных элементов по упругой модели кусочно-однородной слоистой толщи вмещающих пород трубки в осесимметричной постановке проведены расчеты напряжений, деформаций и смещений вокруг подземных выработанных пространств и карьера для следующих шести последовательных этапов отработки месторождения:

- карьер с положением уступов на момент завершения его отработки в 1980г (исходная горнотехническая ситуация);
- этапы последовательной подземной отработки запасов блоков 6,5,7,8;
- карьер с планируемым положением уступов после его углубки в результате разноски бортов карьера и отработки запасов блока №1.

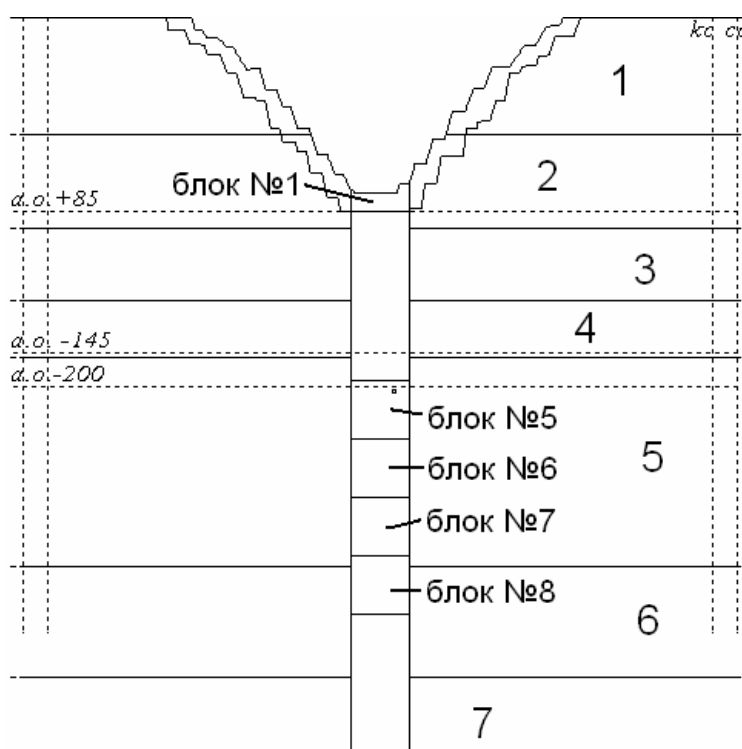


Рис.2. Схема расчетной области.

Всего было решено 12 задач (упругая модель, кусочно-однородный слоистый массив, осесимметричное напряженное состояние). Вдвое большее количество задач объясняется попыткой учесть асимметрию карьера с помощью задач в двумерной постановке. В каждой из решенных задач карьер моделировался симметричной относительно центральной оси трубки воронкой. Конечные элементы представляют собой кольца треугольного поперечного сечения. Исследуемая область массива горных пород – круговой цилиндр диаметром и глубиной 4 км (центральная ось цилиндра является вертикальной центральной осью трубки). Геометрические параметры карьеров соответствуют вертикальному разрезу (юг-север) месторождения. Диаметр трубки принимался равным 96 м. В целом моделировалась ситуация с завышенными объемами выработанных пространств с целью получения верхних оценок величин деформаций, смещений и напряжений в массиве горных пород.

Задачи решались в дополнительных смещениях, обусловленных созданием полостей в первоначально напряженном массиве. Количество узлов сетки конечных элементов – порядка 15 тысяч. Минимальный размер элемента вблизи выработанных пространств – около 3 м. Системы линейных уравнений относительно узловых смещений решались итерационным методом последовательной верхней релаксации. Величина ускоряющего множителя равнялась 1.97. На

заключительных итерациях после достижения параметром сходимости величин $6 \cdot 10^{-7}$ его значение снижалось до 1.25. Итерационный процесс прекращался при достижении предельного значения параметра сходимости 10^{-8} . Ошибка, обусловленная дискретизацией области на конечные элементы, не превышает 5%.

Граничные условия: на внешней вертикальной границе расчетной области (боковой поверхности цилиндра диаметром и глубиной 4км) – нулевые значения горизонтальных компонент дополнительных смещений и полных касательных напряжений, на нижней горизонтальной границе на глубине 4км – нулевые значения дополнительных смещений, верхняя граница и поверхность карьера – свободны от напряжений (нулевые векторы поверхностных усилий). Начальное напряженное состояние соответствует гидростатическому напряженному состоянию: исходные горизонтальные компоненты напряжения σ_r^0 (ориентированная в радиальном направлении к центральной оси трубки) и σ_θ^0 (ориентирована в окружном направлении, перпендикулярном радиальному направлению) равны начальной вертикальной компоненте σ_z^0 , определяемой весом пород γH (H – глубина, γ – удельный вес пород 27 кН/м^3).

При моделировании *закладочного массива* использовался ряд предположений о характере его деформирования, позволивших анализировать влияние пригрузки искусственного массива, связанное со смещениями границ формируемых выработанных пространств.

В случае *кусочно-неоднородной среды*, когда исследуемая область массива горных пород представлена несколькими подобластями с различными деформационными свойствами, существует следующая особенность распределения напряжений и деформаций. На контактных границах возможны разрывы компонент тензоров напряжений и деформаций. Данное обстоятельство становится понятным при физическом анализе простого примера одноосного сжатия композитной пластины, состоящей из двух пластинок с различными механическими свойствами и скрепленных (до деформирования) вдоль контактной поверхности.

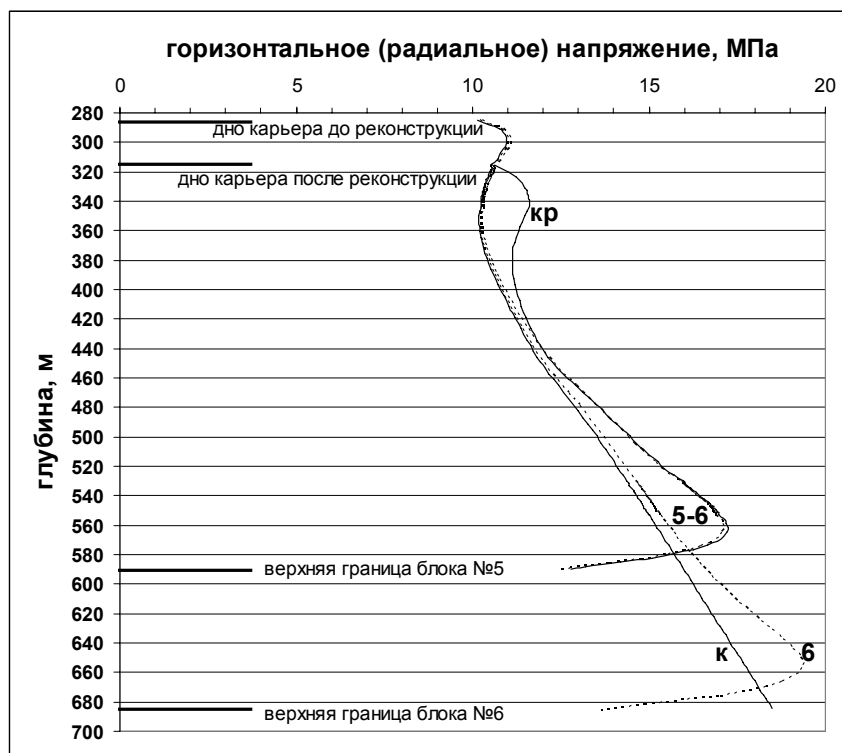


Рис.3. Распределение горизонтальных напряжений в рудном массиве переходной зоны.

4. Результаты расчетов

Выполнен геомеханический анализ влияния открытых и подземных горных работ на НДС массива в окрестности стволов, в переходной зоне и в предохранительном целике под Метегеро-

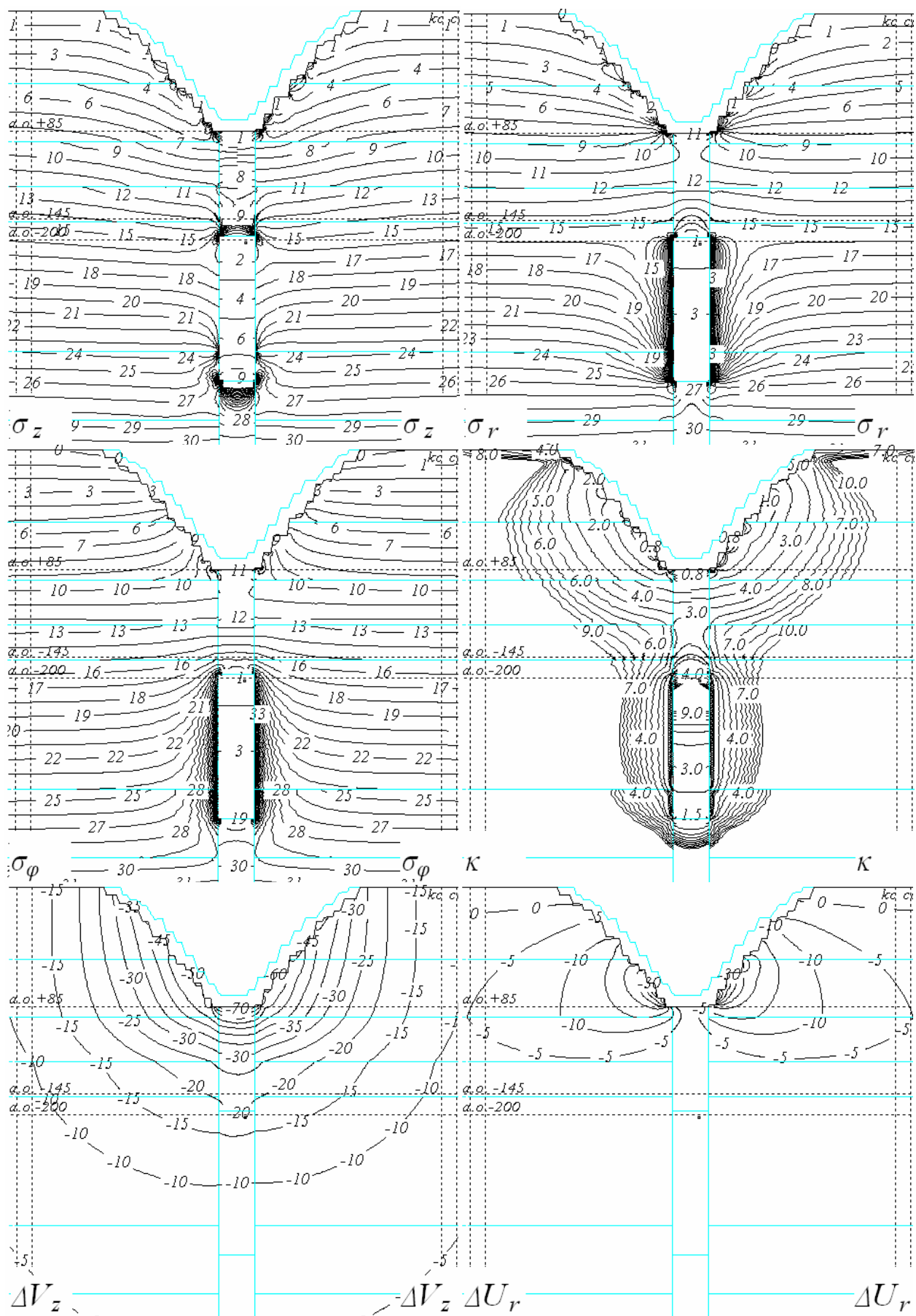


Рис.4. НДС массива для реконструированного карьера при отработанных блоках №№5-8 и №1.

ичерским водоносным комплексом. Получены прогнозные оценки величин смещений, деформаций и напряжений массива горных пород вокруг выработанных пространств на различных этапах развития горных работ. Возможные разрушения оценивались по критерию Кулона-Мора (сцепление C и угол внутреннего трения φ пород равны 1.44МПа^* и 30° , соответственно).

На рис.3 показаны графики распределения горизонтального (радиального) напряжения и в переходной зоне между дном карьера и верхней границей подземного выработанного пространства на центральной вертикальной оси трубки на различных этапах отработки месторождения. Линия **к** соответствует исходной горнотехнической ситуации до начала подземных работ; на расстоянии 13-14м под дном карьера фиксируется максимум в распределении напряжений, равный 11 МПа. Линия **б** соответствует этапу отработки блока №6; на расстоянии 30-35 м от верхней границы выработанного пространства блока №6 фиксируется максимум горизонтальных напряжений около 19.5 МПа. Линия **5-6** соответствует этапу выемки запасов блоков №5-6 (современное состояние горных работ); на расстоянии 30-35 м над верхней границей выработанного пространства блока №5 фиксируется максимум горизонтальных напряжений около 17 МПа. Отработка запасов блоков №5-6 практически не сказывается на напряженном состоянии рудного массива вблизи дна карьера. Дальнейшее ведение горных работ в блоках №7-8 не изменяет напряженного состояния массива горных пород переходной зоны между дном карьера и верхней границей блока №5. Линия **кр** соответствует этапу после реконструкции карьера с выемкой запасов блока №1 при отработанных запасах блока №5-8; на расстоянии 25-30 м под дном реконструированного карьера формируется максимум горизонтальных напряжений около 11.6 МПа. Реконструкция карьера (разноска бортов и его углубка) практически не влияет на напряженное состояние вблизи подземного выработанного пространства. На расстояниях более 100м от дна карьера его влияние на сформированное напряженное состояние не превышает 5%.

На рис.4 показаны изолинии компонент напряжений (МПа) и коэффициента запаса прочности массива горных пород вокруг карьера и подземного выработанного пространства на результирующем этапе ведения горных работ (отработаны запасы блоков №№5-8 и выполнена реконструкция карьера с углублением его дна в результате выемки запасов блока №1). Там же показаны изолинии компонент дополнительных смещений (мм) массива горных пород, обусловленных реконструкцией карьера. Реконструкция карьера приводит к смещению его дна вверх на 70мм. Изменения напряженного состояния массива горных пород вблизи стволов не превышают 1 МПа. Максимальное радиальное смещение массива у стволов к карьере составляет 5 мм на контакте вмещающих пород 2 и 3-го инженерно-геологических комплекса на глубине около 340м. В целом влияние реконструкции карьера на состояние верхней части стволов рудника сопоставимо с влиянием на стволы сформированного подземного выработанного пространства блоков №5-№8. Отметим смещение приповерхностного слоя в противоположную от карьера сторону после реконструкции. Критические значения коэффициента запаса, меньшие 1, в уступах бортов и на дне карьера, а также вблизи подземного выработанного пространства свидетельствуют о возможности разрушения массива горных пород.

Выводы

На основании выполненных теоретических оценок изменений НДС массива горных пород, обусловленных открытыми и подземными горными работами, сделаны следующие предварительные **выводы**:

1. Углубка карьера не приведет к значительным изменениям НДС массива горных пород вокруг стволов и, как следствие, не потребует дополнительных затрат на их поддержание.
2. Выемка запасов блоков №7 и №8 не окажет существенного влияния на сформированное в результате отработки блоков №6 и №5 напряженно-деформированное состояние массива горных пород в предохранительном целике.

* Сцепление и угол внутреннего трения соответствуют прочности массива горных пород на сжатие 5 МПа.

3. Разработанная модель и полученные параметры НДС являются основой для последующего анализа и интерпретации данных гидрогеомеханического мониторинга.

4. Результаты наблюдений за смещениями и деформациями массива позволят уточнить параметры геомеханической модели, а прогнозные теоретические оценки повысят эффективность экспериментальных исследований в шахтных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников В.Д. и др. Геомеханический анализ напряженного состояния массива горных пород при отработке опытно- промышленного блока рудника «Интернациональный» // Труды международной конференции «Проблемы и перспективы развития горных наук», посвященной 60-летию образования Горно-геологического института СО АН СССР – Института горного дела СО РАН, 1-5 ноября 2004г., Новосибирск. Том 1 «Геомеханика». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2005. С.103-112.

2. Горшков Г.П., Якушова А.Ф. Общая геология. – М.: Издательство Московского университета, 1973. С.367-382. С.180-219.

3. Мюллер Л. Геология скальных массивов. – М.: Мир, 1971. С.101.

4. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986.

5. Исследовать процесс сдвижения вмещающих пород и поверхности при подземной отработке рудников «Интернациональный» и «Мир». **Разработать** рекомендации по охране дренажных и изолирующих систем. (Промежуточный и заключительный отчеты о НИР). – Мирный: Якутнипроалмаз, 1985, 1986.

6. Kurlenya M.V., Popov S.N., Boltenhagen I.L. Geomechanical substantiation of extraction of undermined ore deposit // Ground Control in Mining (Proceedings of the 10th International Conference on Ground Control in Mining). – Morgantown: West Virginia University, 1991. P.268-271.

7. Shalaurov V.A., Popov S.N., Boltenhagen I.L. Geomechanical substantiation of extraction of undermined copper ore deposit // Geomechanics 91 (Proceedings of the International Conference Geomechanics 91). – Rotterdam: Balkema, 1992. P.83-87.

8. Барышников В.Д., Болтенгаген И.Л., Коврижных А.М. Определение напряжений методом целевой разгрузки // Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», 6-9 октября 2003г., Новосибирск. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. С.126-131.