

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ РУДНИКОВ «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ» И «МИР»

И.И. Айнбиндер¹, О.В. Овчаренко¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,
e-mail: geoexpert@yandex.ru

Аннотация: Приведены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива на рудниках «Интернациональный» и «Мир» при отработке глубоких горизонтов. Выполнена оценка НДС горного массива на руднике «Интернациональный» при отработке запасов в опасной по гидрогеомеханическим факторам зоне Метегеро-Ичерского горизонта, из которого возможны прорывы воды и пульпы, приводящие к растворению соляных пластов, разрушению выработок. Рассмотрена геотехнология отработки запасов рудника «Интернациональный» в этой зоне, полностью исключающая поступление воды в результате создания защитного замкнутого гидроизолирующего контура, формирующегося при проходке кольцевых выработок на границе рудного тела и вмещающих пород и закладке их твердеющими смесями. Показано, что наличие кольцевого слоя из закладки не приводит к существенным изменениям напряжений в горном массиве и не ухудшает геомеханическую ситуацию в целом, что обеспечивает устойчивость горных конструкций и безопасность ведения горных работ при последующей выемке запасов. Выбором необходимых параметров водонепроницаемого закладочного материала можно обеспечить надежную защиту выработок от поступления подземных вод. На глубоких горизонтах рудника «Мир», где исключено проникновение подземных вод, возможно возобновление горных работ. Проведено математическое моделирование изменения НДС массива при выемке запасов с учетом склонности пород к горным ударам. Во вмещающих породах выявлены зоны высокой опасности по горным ударам, где требуются специальные способы выемки для обеспечения безопасности горных работ.

Ключевые слова: комбинированная геотехнология, система разработки горизонтальными слоями с закладкой, водоносный горизонт, гидроизолирующий контур, безопасные параметры, напряженно-деформированное состояние горного массива, горные удары, математическое моделирование.

Для цитирования: Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В. Особенности геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудников «Интернациональный» и «Мир» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11. – С. 57–69. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

Geomechanical behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines

I.I. Aynbinder¹, O.V. Ovcharenko¹

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: geoexpert@yandex.ru

Abstract: The mathematical modeling data on the stress-strain behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines are reported in the article. The stress-strain analysis of rock mass in Internatsionalny mine is carried out for the hydro-geomechanically hazardous zone of Metegero-Ichersky aquifer representing the risk of water and mass inrushes conducive to dissolution of salt strata and mine destruction. The mining technology approved by Internatsionalny mine for this zone totally eliminates water inflows owing to creation of a protective closed waterproof wall by means of drilling a ring row of boreholes at the ore body and rock mass contact and filling them with solidifying mixtures. The ring wall made of cemented backfill induces no alteration of stresses in rock mass and has no adverse effect on the geomechanical situation, which ensures stability of mine structures and safety of further mining. Correct selection of waterproof backfill parameters can ensure reliable protection of mine excavations from groundwater inflow. On deep levels in Mir mine, with groundwater invasion excluded, it is possible to recommence mining operations. The mathematical modeling of the stress-strain behavior of rock mass under mining was carried out with regard to risk of rock bursts. In the revealed zone of higher rockburst hazard in rock mass, it is necessary to exercise special mining methods to ensure the mine safety.

Key words: hybrid geotechnology, cut-and-fill method, aquifer, waterproof wall, safe parameters, stress-strain behavior of rock mass, rock bursts, mathematical modeling.

For citation: Aynbinder I. I., Ovcharenko O. V. Geomechanical behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines. *MLAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(11):57-69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

Введение

Основные тенденции развития технологий разработки кимберлитовых месторождений Якутии связаны с применением комбинированных геотехнологий, сочетающих в себе открытый и подземный способы выемки. На этапе подземной выемки успешно применяются сплошные слоевые системы с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, обеспечивающие безопасность ведения горных работ [1 – 5].

Трудности отработки кимберлитовых трубок, в частности «Мир» и «Интер-

национальная», обусловлены большой глубиной ведения горных работ, сложными гидрогеологическими условиями, удароопасностью породных массивов.

Основную опасность при отработке запасов на руднике «Интернациональный» представляет Метегеро-Ичерский водоносный комплекс (МИВК), расположенный в отметках +25/–130 м. В настоящее время запасы глубин ниже гор. –142 м отработаны с применением слоевой выработки руды с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. При этом очистные работы подходят к границам МИВК. Отработка

запасов в пределах МИВК требует проведения специальных мероприятий по исключению прорыва воды и пульпы из водоносных коллекторов [6].

Одна из мер предотвращения прорыва рассолов в зону ведения горных работ — это опережающая отработка рудного массива по контуру рудного тела с закладкой выработанного пространства водонепроницаемыми твердеющими смесями. Это позволит осуществить выемку основных запасов в защищенной от водопроявлений зоне с применением наиболее производительных систем разработки [7].

На руднике «Мир» после аварии с прорывом воды и пульпы в выработанное пространство наиболее перспективными к разработке являются запасы, залегающие на глубоких горизонтах [8]. Основную проблему при их выемке представляют динамические проявления горного давления, поскольку, как и на руднике «Интернациональный», массивы глубоких горизонтов отнесены к опасным по горным ударам [9].

Для этих рудников ведение работ в зонах, опасных по водопроявлениям, в условиях повышенного горного давления требует предварительного анализа происходящих в массиве гидрогеомеханических процессов с целью своевременного обнаружения признаков их неблагоприятного развития [6].

Для оценки устойчивости обрабатываемых массивов, в том числе в потенциально опасных зонах, определяемых геологическими и горнотехническими факторами, при ведении очистных работ по технологиям, предлагаемым ИПКОН РАН [7, 8, 10, 11], проведено математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) при выемке запасов трубок «Интернациональная» и «Мир» слоевыми системами с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями.

Особенности геомеханического состояния массива горных пород на руднике «Интернациональный» при отработке запасов в зоне Метегеро-Ичерского горизонта

В настоящее время на руднике «Интернациональный» отработка запасов осуществляется подземным способом с применением слоевой выемки руды с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, причем запасы, залегающие ниже гор. –142 м, уже отработаны.

Далее планируется выемка запасов эксплуатационного блока II очереди (мощность 50 м, отметки +50/0 м), защищенного от нештатных ситуаций вышерасположенным предохранительным целиком мощностью 35 м (отметки +85/+50 м). Выбор безопасной технологии выемки запасов этого эксплуатационного блока зависит от особенностей формирования и развития опасных зон в обводненном горном массиве, что определяет необходимость разработки дополнительных эффективных технических решений, направленных на защиту выработок от прорыва высоконапорных подземных вод [7, 8, 10].

После выемки запасов этого блока и закладки выработанного пространства планируется отработка запасов в пределах МИВК — сформированного в результате ведения горных работ, ограниченного сверху и снизу закладочными массивами рудного целика, расположенного в интервале отметок 0/–142 м.

Это новый опасный объект, выемка которого осложняется как большой глубиной залегания, так и наличием водообильного высоконапорного сильноминерализованного МИВК, включающего в себя 10 пластов коллекторов, сложенных трещиноватыми породами. Верхние коллекторы характеризуются низкой проницаемостью и незначитель-

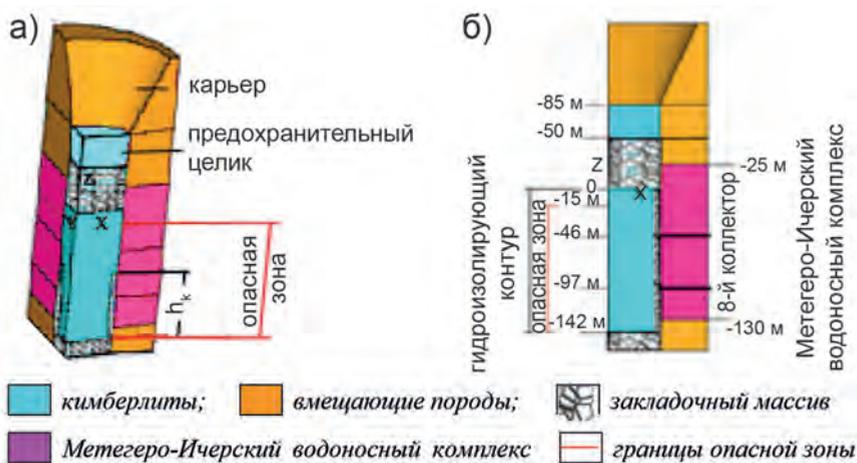


Рис. 1. Моделирование НДС горного массива на различных стадиях сооружения гидроизолирующего контура. Принципиальная схема: разрез по осям трубки X и Y (а); разрез по осям X и Z (б); h_k — высота гидроизолирующего контура

Fig. 1. Modeling of stress-strain state of rock mass at different stages of construction of the protective circuit: a — section on the pipe axes X and Y; b — section on the pipe axes X and Z; h_k — height of the protective circuit

ной водообильностью. Основным водным объектом является наиболее водообильный 8-й водоносный коллектор, залегающий в интервале $-46/-97$ м. Границы опасной зоны от несдренированного МИВК, согласно исследованиям [11], находятся в интервале глубин $-15/-142$ м. Рудный целик практически полностью находится в этой зоне, где возможны прорывы воды и пульпы из водоносного горизонта, растворение соляных пластов, разрушение выработок. Для исключения этих явлений и обеспечения безопасности выемки запасов в пределах МИВК требуется проведение специальных мероприятий.

Отработка запасов целика планируется после дренирования и снятия напоров, однако при этом все еще остается вероятность проскоков воды в горные выработки. Поэтому предложена геотехнология [11], полностью исключающая поступление воды благодаря созданию защитного замкнутого гидроизолирующего контура, который формируется путем проходки на границе рудного тела и вмещающих пород кольцевых вырабо-

ток сечением 5×5 м, начиная с гор. -142 м, в восходящем порядке, с закладкой их твердеющими смесями. В результате запасы, подлежащие отработке в интервале $0/-142$ м, будут отделены от вмещающих пород слоем закладки на всю мощность обрабатываемого блока и, таким образом, защищены от поступления вод МИВК.

На рис. 1 представлена принципиальная схема выемки запасов трубки «Интернациональная» в пределах МИВК с опережающей отработкой массива по контуру рудного тела, используемая при моделировании НДС горного массива.

Математическое моделирование изменения НДС горного массива при выемке запасов в зоне МИВК выполнено методом конечных элементов [12–14] с использованием программного комплекса ANSYS [15].

В силу симметрии задачи достаточно рассмотреть часть участка, ограничив расчетную модель сечениями, проходящими по осям X и Y трубки (см. рис. 1, а), на которых заданы условия закрепления: горизонтальные смещения,

Таблица 1

Физико-механические характеристики горного и закладочного массивов
Physical and mechanical characteristics of rock mass

№ п/п	Породы (закладка)	Модуль деформации, E , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Удельный вес, γ , г/см ³
1	Кимберлиты	3,3	0,21	2,5
2	Вмещающие породы (известняки, доломиты, алевролиты)	4,0	0,25	2,7
3	Искусственный закладочный массив	1,0	0,20	2,0

соответственно $U_x = 0$ и $U_y = 0$. Нижняя граница модели жестко закреплена, $U_x = U_y = U_z = 0$.

В соответствии с исходным полем напряжений, на границе моделируемого участка задавалась поверхностная распределенная горизонтальная нормальная нагрузка, составляющая 0,7 от вертикальной (по Звонареву), определяемой весом налегающих пород. Нагрузка на дно карьера определялась критическим уровнем воды в карьере (50 м) и наличием бетонной подушки мощностью 1 м.

Исходные данные для моделирования:

- размеры карьера в плане по дну — 60×104 м;
- угол откоса борта карьера — 65° ;

- абсолютная отметка дневной поверхности — $+400$ м;
- мощность предохранительного целика под дном карьера — 35 м;
- мощность отработанной и заложенной части эксплуатационного блока II очереди — $50,0$ м;
- высота гидроизолирующего контура — $h_k = 0 - 142$ м.

В качестве геомеханической модели массива принята сплошная, однородная, квазиизотропная, упругая, весомая среда. Физико-механические свойства рудного, породного и закладочного массивов приведены в табл. 1.

Сравнение полученных распределений напряжений в массиве на различных этапах создания гидроизоли-

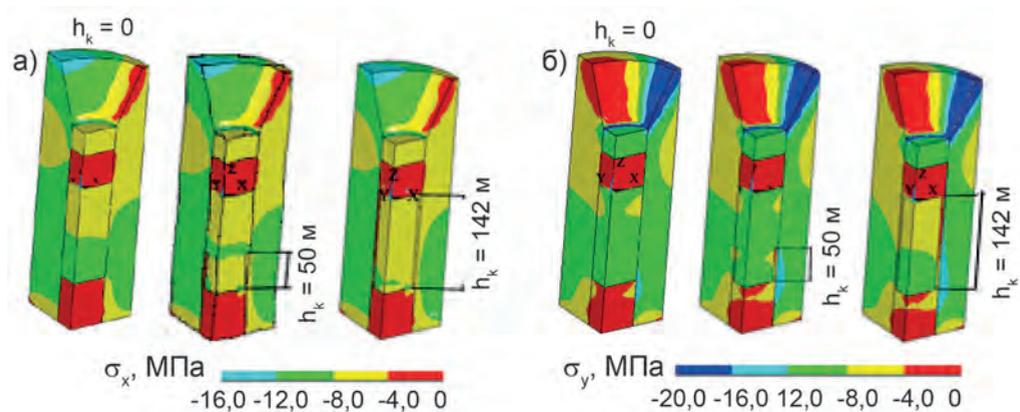


Рис. 2. Распределение горизонтальных (s_x, s_y) напряжений в рудном массиве на различных этапах создания гидроизолирующего контура ($h_k = 0, 50, 142$ м)

Fig. 2. Distribution of horizontal (s_x, s_y) stresses in the rock mass on the different stages creation of the protective waterproofing circuit

рующего контура (рис. 2) показало, что наличие этого контура существенно не изменяет напряжения в горном массиве. Величины напряжений в зоне будущих очистных работ составляют: $\sigma_x = 6,0\text{--}8,0$ МПа (даже несколько снижаются по сравнению с напряжениями, действующими до начала формирования контура), $\sigma_y = 8,0\text{--}12,0$ МПа, $\sigma_z = 6,0$ МПа. В предохранительном целике под дном карьера напряжения также не увеличиваются, при последующей выемке запасов горные конструкции будут устойчивы. Это дает основание считать, что предлагаемая технология не ухудшает геомеханическую ситуацию в целом, и подбором необходимых параметров водонепроницаемого закладочного материала можно обеспечить надежную защиту зоны очистных работ от поступления вод МИВК.

Анализ геомеханического состояния массива горных пород при возобновлении добычных работ на глубоких горизонтах рудника «Мир»

Возобновление разработки запасов трубки «Мир» после ликвидации последствий аварии на руднике предполагает временную консервацию запасов верхних горизонтов, ликвидацию водного объекта в карьере, проведение необходимых восстановительных работ, проходку новых стволов и строительство новых горизонтов, переход горных работ на глубокие горизонты (1000–1700 м) [8, 11] ниже зоны влияния аварийной ситуации, применение вариантов слоевых систем разработки с закладкой выработанного пространства.

В настоящее время под дном карьера сформирован предохранительный подкарьерный рудный целик мощностью 40 м. Ниже него расположен массив мощностью 100 м, представляющий собой переслаивание кимберлитов и твер-

деющей закладки. Под этими слоями располагается рудный массив, выемка которого предусматривается, начиная с гор. –1220 м, в восходящем порядке. В интервале глубин –330/–517 м оставляется новый предохранительный целик, минимальная мощность которого, равная 187 м [11], достаточна для надежной защиты зоны ведения очистных работ от проникновения воды из затопленных выработок, и определяет верхнюю границу отработки. Таким образом, в интервале –517/–1220 м возможна выемка запасов, безопасная по гидрогеомеханическим факторам. Отработку запасов предполагается вести в восходящем порядке тремя эксплуатационными блоками мощностью 250 м (блок 3), 200 м и 213 м (блоки 2 и 1 соответственно) с оставлением между ними двух рудных целиков мощностью 20 м и закладкой выработанного пространства твердеющими смесями.

В этом интервале глубин массив горных пород месторождения отнесен к опасным по горным ударам, поэтому для предотвращения динамических явлений необходимо особое внимание к выбору схем подготовки и проведению подготовительных выработок во вмещающих породах, склонных к горным ударам. Для обоснования такого выбора требуется оценить потенциальную опасность возникновения динамических явлений при выемке запасов, выделив наиболее нагруженные участки массива — зоны опорного давления от очистных работ, т.е. зоны действия наибольших сжимающих напряжений.

Количественной характеристикой удароопасности массива служит коэффициент K , равный отношению максимальных действующих напряжений (s^{\max}) к пределу прочности пород на одноосное сжатие ($s_{\text{сж}}$) [16, 17]. Массив пород, склонных к горным ударам, считается опасным по горным ударам, если $K \geq 0,8$.

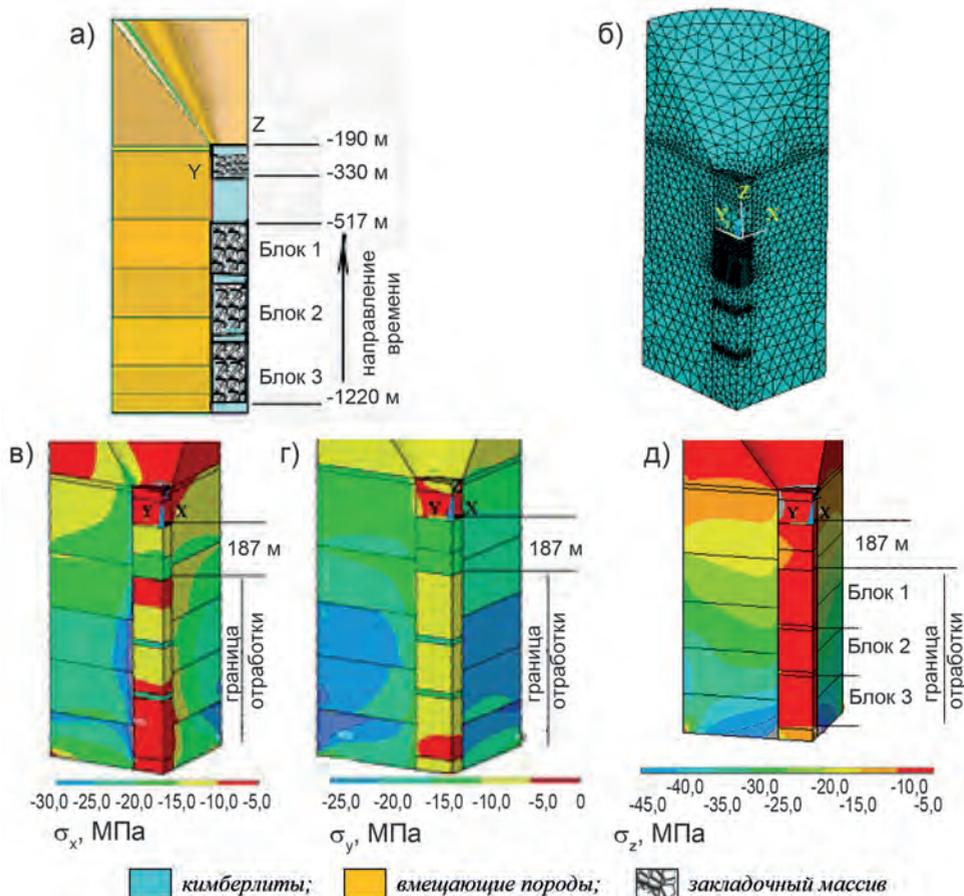


Рис. 3. Моделирование НДС обрабатываемого массива на глубоких горизонтах рудника «МИР»: схема участка (а, б); распределение горизонтальных (s_x , s_y) и вертикальных (s_z) напряжений после выемки запасов до границы отработки (мощность оставляемого целика – 187 м) (в–д)

Fig. 3. Modeling of stress-strain state of rock mass on deep levels of mine «Mir»: Site diagram and distribution of stresses in the rock mass (s_x , s_y , s_z)

Схема участка, рассматриваемого при моделировании изменения НДС массива при возобновлении добычных работ на глубоких горизонтах рудника «Мир» (объемная модель), показана на рис. 3. Граничные условия при моделировании такие же, как в предыдущем случае (с учетом различия глубин ведения горных работ, в этом случае глубина от дневной поверхности составляет 1555 м).

Возобновление добычных работ на глубоких горизонтах рудника «Мир»

предполагает полную ликвидацию водного объекта в карьере. Однако, поскольку реальные нагрузки на нижележащий массив от затопленных выработок и обрушенных пород оценить сложно, в расчетах рассматривался самый тяжелый вариант, когда карьер затоплен минерализованными растворами.

Учтены поверхностные распределенные нормальные нагрузки на дно и борта карьера, создаваемые гидростатическим давлением воды в затопленном карьере и определяемые высотой

Таблица 2

Физико-механические характеристики горного и закладочного массивов
Physical and mechanical characteristics of rock mass

№	Породы (закладка)	Модуль деформации, E , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Удельный вес, γ , г/см ³	Предел прочности на одноосное сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа
1	Кимберлиты	2,8	0,25	2,5	34,0
2	Известняки, алевролиты доломиты и ангидриты верхних свит	4,0	0,25	2,57	23,0
3	Долериты	5,4	0,25	3,05	42,0
4	Галогенно-карбонатная свита	5,4	0,25	2,8	30,0
5	Доломиты	6,5	0,25	2,68	
6	Известняки, алевролиты доломиты и ангидриты нижних свит	9,0	0,25	2,7	30,0 – 40,0
7	Закладка	1,0	0,25	2,0	2,0

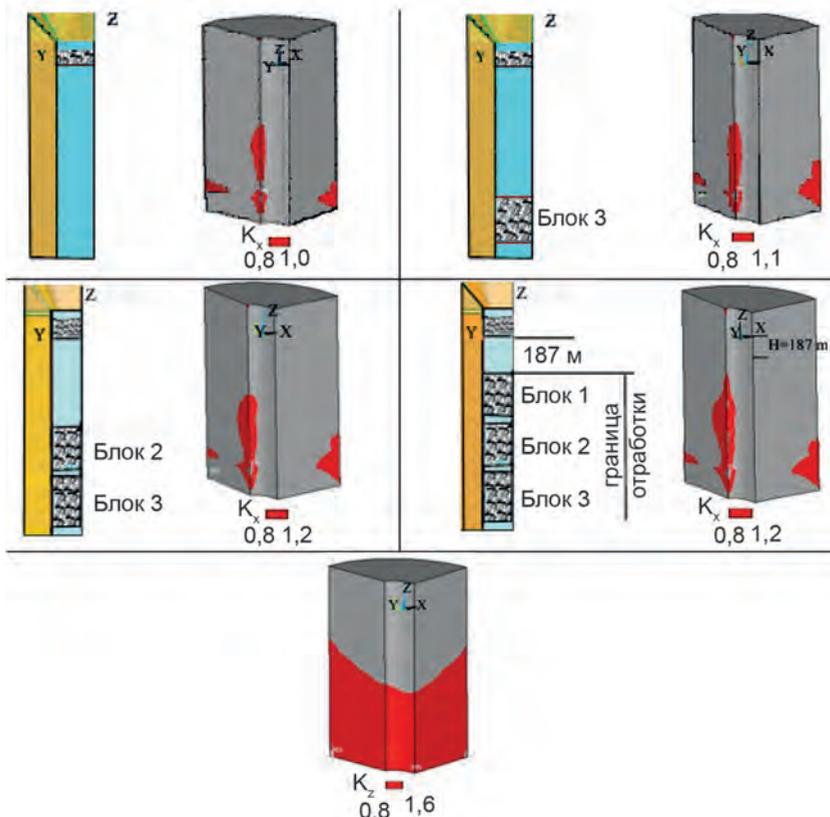


Рис. 4. Зоны во вмещающих породах, потенциально опасные по горным ударам, на различных этапах выемки запасов: схема участка и распределение коэффициента K , характеризующего удароопасность горного массива

Fig. 4. The rockbursts hazard zones into the enclosing rocks on the different stages of mining: site diagram and distribution of coefficient K , characterizing the rockburst hazard

столба воды в карьере, удельным весом минерализованных рассолов, а также мощностью породной отсыпки на дне карьера.

Исходные данные для моделирования:

- глубина карьера от поверхности — 525 м;
- форма и параметры рудного тела в горизонтальной плоскости — эллипс с размерами осей 150×300 м;
- высота столба воды в затопленном карьере — 400 м, удельный вес минерализованных рассолов — 1,3 г/см³;
- мощность породной отсыпки на дне карьера — 50 м, удельный вес — 2,2 г/см³.

Физико-механические свойства рудного, породного и закладочного массивов приведены в табл. 2.

Свойства кимберлитов предохранительного подкарьерного целика в результате аварийной ситуации и воздействия рассолов существенно изменились, поэтому при моделировании для них приняты сниженные физико-механические показатели.

Для массива, представляющего собой переслаивание кимберлитов и твердеющей закладки, приняты усредненные показатели, близкие к показателям закладочных смесей.

При моделировании рассматривалось изменение НДС массива при последовательной выемке блоков, начиная с гор. -1220 м. На рис. 3 показаны результаты, полученные для заключительного этапа выемки, когда горные работы достигли границы отработки и мощность оставляемого целика равна 187 м.

Как следует из рисунков, преобладающими напряжениями в массиве являются сжимающие напряжения, что обусловлено большой глубиной залегания.

Во вмещающих породах определяющее значение имеют нагрузки, обусловленные исходным полем напряже-

ний. Эти породы, обладающие большой прочностью, к тому же увеличивающейся с глубиной, на этих этапах выемки устойчивы.

Отработка Блоков 1–3, достаточно удаленных от вышележащих горизонтов, не влияет на геомеханическую ситуацию на верхних горизонтах, определяемую, в основном, нагрузками от затопленного карьера.

При уменьшении мощности отрабатываемого рудного массива до 187 м горизонтальные сжимающие напряжения в нем составляют $s_x = 10,0–20,0$ МПа, $s_y = 10,0–15,0$ МПа, вертикальные — $s_z = 5,0–15,0$ МПа.

Оценка по критерию Кулона-Мора показала, что рудный массив такой мощности будет устойчивым, поскольку рассчитанный предельный коэффициент сцепления $C^* = 4,0–6,0$ МПа меньше фактического коэффициента сцепления кимберлитов C , не нарушенных на этих глубинах.

В рудном целике горизонтальные деформации растяжения не возникают, а вертикальные, локализованные в небольшой зоне в почве целика на границе с закладочным массивом, опасности не представляют, поскольку не превышают $\varepsilon_z = 0,001–0,0015$, что меньше критических деформаций для кимберлитов ($\varepsilon_{кр.} = 0,003–0,004$).

Оценка состояния двух рудных целиков мощностью 20,0 м, оставляемых на границах эксплуатационных блоков, и по критерию Кулона-Мора, и по значению деформаций растяжения в них ($\varepsilon_z = 0,001–0,002$), свидетельствует об их устойчивости.

Расположение во вмещающих породах потенциально опасных по горным ударам зон, характеризующихся максимальными значениями горизонтальных (s_x) и вертикальных (s_z) сжимающих напряжений, где коэффициенты K (соответственно, K_x и K_z) превышают кри-

тическое значение, равное 0,8, показано на рис. 4.

Как видно из рисунков, во вмещающих породах, склонных к горным ударам, наибольшую опасность представляют вертикальные напряжения в массиве и горизонтальные вблизи контакта с рудным телом. Еще до начала ведения горных работ в Блоках 1–3, в этих породах уже существуют потенциально опасные зоны, где уровень природных напряжений превышает предел прочности на одноосное сжатие, что обусловлено, прежде всего, большой глубиной залегания (до 1700 м), а также различием деформационных характеристик вмещающих пород и кимберлитов. Зона, опасная по вертикальным напряжениям, охватывает вмещающие породы практически во всем интервале глубин планируемых горных работ и сохраняется на всех этапах выемки.

Зоны, опасные по горизонтальным напряжениям, формируются на контакте с рудным телом и на некотором удалении от него. Они более локальны, но это не уменьшает их опасности. На верхних горизонтах отработки блока 1 и в оставляемом рудном целике эти зоны отсутствуют, что обусловлено снижением напряжений под дном карьера. При выемке запасов блоков 1–3, закладке выработанного пространства и увеличении нагрузок на вмещающие породы мощность зон, опасных по горизонтальным напряжениям, по вертикали увеличивается.

Участки вмещающих пород, примыкающие к выемочным блокам, можно отнести к категории «Опасно», соответствующей удароопасному состоянию и требующей проведения противоударных мероприятий уже на начальном этапе, при подготовке к выемке запасов блока 3, для предотвращения горных ударов как в кровле, так и в бортах подготовительных выработок.

В соответствии с классификацией зон в горном массиве, опасных по проявлениям горного давления [7], выявленные участки во вмещающих породах относятся к зонам высокой опасности и требуют специальных способов управления горным давлением для обеспечения безопасных условий отработки. Необходимо особое внимание к выбору схем подготовки и проведению подготовительных выработок во вмещающих породах, где высок риск возникновения горных ударов.

Выводы

Математическое моделирование изменения НДС горного массива при отработке запасов глубоких горизонтов кимберлитовых трубок «Интернациональная» и «Мир» показало следующее:

1. При выемке запасов трубки «Интернациональная» в интервале отметок 0/–142 м в зоне Метегеро-Ичерского горизонта создание защитного замкнутого гидроизолирующего контура — кольцевого слоя из твердеющей водонепроницаемой закладки на границе рудного тела и вмещающих пород — обеспечивает надежную защиту зоны ведения горных работ от поступления подземных вод при сохранении устойчивости горных конструкций.

2. После обязательной ликвидации водного объекта в карьере трубки «Мир», проведения необходимых восстановительных работ, возобновление разработки запасов на глубоких горизонтах ниже зоны влияния аварийной ситуации возможно при применении вариантов слоевых систем разработки в восходящем порядке с закладкой выработанного твердеющими смесями. При этом, с учетом выявленных во вмещающих породах зон высокой опасности по горным ударам, требуются специальные способы управления горным давлением для обеспечения безопасных условий отработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплунов Д. Р. Комбинированные геотехнологии как основа перехода к новому технологическому укладу / Комбинированная технология: переход к новому технологическому укладу. X Международная конференция. — Магнитогорск: МГТУ, 2019. — С. 21–22.
2. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Геотехнологические и геомеханические особенности перехода от открытых к подземным работам на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S56. — С. 67–79.
3. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Проектирование формирования и развития горно-технических систем при комбинированной геотехнологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S45-1. — С. 229–240.
4. Zehirov S., Kaykov D., Koprev I. A review of combining open-pit and underground mining methods around the world // Journal of Mining and Geological Sciences. 2017. Vol. 60. Part II. Mining, Technology and Mineral Processing. Pp. 17–20.
5. Olavarria S., Adriasola P., Karzulovic A. Transition from open pit to underground mining at Chuquicamata, Antofagasta, Chile / The South African Institute of Mining and Metallurgy. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering. 12–14 Oct., 2015, Cape Town, South Africa.
6. Методические указания по определению параметров опасных зон на горных предприятиях АК «АЛРОСА». — М.: ИПКОН РАН, АГЭЦ, 2007.
7. Айнбиндер И. И., Каплунов Д. Р. Риск-ориентированный подход к выбору геотехнологий подземной разработки месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 5–19. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19.
8. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г. Основные положения стратегии возобновления добычи руды на руднике «Мир» / Опыт и практические шаги по восстановлению горнодобывающего предприятия после аварии. Материалы Всероссийской конференции. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — С. 33–42.
9. Аксенов А. А., Золотин В. Г., Пуль Э. К. Исследования склонности кимберлитовых месторождений Мало-Ботубинского района к горным ударам // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 96–100.
10. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A., Myaskov A. V., Kosureva M.A. Solution of geological problems in underground mining of deep iron deposits // Eurasian Mining. 2018. No 1. Pp. 35–40.
11. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Красюкова Е. В. Обоснование геотехнологии безопасной отработки коренных месторождений кимберлитов в условиях переходных зон и больших глубин на основе выделения опасных зон, дифференцированных по гидрогеомеханическим факторам / Научные основы безопасности горных работ. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. — М.: ИПКОН РАН, 2018.
12. Jalbout A., Simser B. Rock mechanics tools for mining in high stress ground conditions at Nickel Rim South Mine / Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2014. Pp. 189–208. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_11_Jalbout.
13. Seccombe R. Numerical modeling of mining subsidence. Bachelor Thesis. 2014.
14. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. The finite element method for solid and structural mechanics. Butterworth–Heinemann, 2013. 672 p.
15. ANSYS Release 11.0. Documentation. Structural analysis guide. December 2006.
16. Замесов Н. Ф., Айнбиндер И. И. Горные удары и стратегия разработки рудных месторождений на больших глубинах. — М.: ИПКОН АН СССР, 1984.
17. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра, 1985. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kaplunov D. R. Hybrid geotechnologies as a framework for the transition to a new wave of technological innovation. *Kombinirovannaya tekhnologiya: perekhod k novomu tekhnologicheskomu ukladu. X Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Hybrid Geotechnology: Transition to a New Wave of Technological Innovation. X International Conference Proceedings], Magnitogorsk, MGTU, 2019, pp. 21 – 22. [In Russ].
2. Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. Geomechanical and geotechnical features of transition from open pit to deep-level underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. No S56, pp. 67 – 79. [In Russ].
3. Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. Mine planning and design in hybrid open pit/underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no S45-1, pp. 229 – 240. [In Russ].
4. Zehirov S., Kaykov D., Koprev I. A review of combining open-pit and underground mining methods around the world. *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2017. Vol. 60. Part II. Mining, Technology and Mineral Processing. Pp. 17 – 20.
5. Olavarria S., Adriasola P., Karzulovic A. Transition from open pit to underground mining at Chuquicamata, Antofagasta, Chile. *The South African Institute of Mining and Metallurgy. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering*. 12 – 14 Oct., 2015, Cape Town, South Africa.
6. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu parametrov opasnykh zon na gornykh predpriyatiyakh AK «ALROSA»* [Guides to determine parameters of hazardous zones in ALROSA mines], Moscow, IPKON RAN, AGETS, 2007. [In Russ].
7. Aynbinder I. I., Kaplunov D. R. Risk-oriented approach to selection of deep-level underground mining technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 4, pp. 5 – 19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19.
8. Aynbinder I. I., Patskevich P. G. General provisions of mining recommencement strategy for Mir mine. *Opyt i prakticheskie shagi po vosstanovleniyu gornodobyvayushchego predpriyatiya posle avarii. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Experience and practice of mine reconstruction after accident. All-Russian Conference Proceedings], Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2018, pp. 33 – 42. [In Russ].
9. Aksenov A. A., Zolotin V. G., Pul' E. K. Rockburst hazard analysis in kimberlite deposits in the Malaya Botuoba area. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no 1, pp. 96 – 100. [In Russ].
10. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosureva M. A. Solution of geological problems in underground mining of deep iron deposits. *Eurasian Mining*. 2018. No 1. Pp. 35 – 40.
11. Aynbinder I. I., Patskevich P. G., Krasnyukova E. V. Justification of safe technology for open pit/underground transition zones and for deep-level mining in primary kimberlite deposits based on differentiation of identified hazardous zone by hydro-geomechanical factors. *Nauchnye osnovy bezopasnosti gornykh rabot. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science of mining safety. All-Russian Conference Proceedings], Moscow, IPKON RAN, 2018. [In Russ].
12. Jalbout A., Simser B. Rock mechanics tools for mining in high stress ground conditions at Nickel Rim South Mine. *Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2014. Pp. 189 – 208. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_11_Jalbout.
13. Seecombe R. *Numerical modeling of mining subsidence*. Bachelor Thesis. 2014.
14. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Butterworth – Heinemann, 2013. 672 p.
15. *ANSYS Release 11.0. Documentation. Structural analysis guide*. December 2006.
16. Zamesov N. F., Aynbinder I. I. *Gornye udary i strategiya razrabotki rudnykh mestorozhdeniy na bol'shikh glubinakh* [Rock bursts and deep-level mining strategy], Moscow, IPKON AN SSSR, 1984.
17. Stavrogin A. N., Protosenya A. G. *Prochnost' gornykh porod i ustoychivost' vyrabotok na bol'shikh glubinakh* [Strength of rocks and stability of mine excavations at great depths], Moscow, Nedra, 1985.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Айнбиндер Игорь Израилевич¹ — д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом, e-mail: geoexpert@yandex.ru,
Овчаренко Оксана Васильевна¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: geoexpert@yandex.ru,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Овчаренко О.В., e-mail: geoexpert@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.I. Aynbinder¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department, e-mail: geoexpert@yandex.ru,
O.V. Ovcharenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: geoexpert@yandex.ru,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: O.V. Ovcharenko, e-mail: geoexpert@yandex.ru.

Получена редакцией 07.07.2020; получена после рецензии 25.08.2020; принята к печати 10.10.2020.

Received by the editors 07.07.2020; received after the review 25.08.2020; accepted for printing 10.10.2020.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПРОГНОЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ

(2020, № 6, СВ 21, 12 с. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-21-3-12)

Сотников Роман Олегович¹ — аспирант, e-mail: ross61@mail.ru,

Вильнер Мария Александровна¹ — аспирант, ¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Выполнен анализ подходов к математическому моделированию массивов и обоснование параметров численной модели ожидаемого развития напряженно-деформированного состояния с учетом геометрических параметров горной выработки, находящейся в зоне влияния динамического воздействия. Модель выполнена на основе уравнений Джонсона-Холмквиста и учитывает формирование зон интенсивной трещиноватости в окрестности рассматриваемой выработки, а также скорость и характер приложения нагрузки. При этом сейсмическое событие рассмотрено как точечный взрыв, возникающий в окрестности горной выработки. Выявлена зависимость характера проявления геодинамических и геомеханических процессов, смещения контура горной выработки и возможности выброса горной массы от интенсивности динамического воздействия.

Ключевые слова: динамическое воздействие, геомеханика, хрупкая горная порода, модель разрушения породы, взрыв, напряженно-деформированное состояние, устойчивость.

FORECAST OF INFLUENCE OF DYNAMIC ROCK PRESSURE MANIFESTATIONS ON THE STABILITY OF OPENINGS

R.O. Sotnikov¹, Graduate Student, e-mail: ross61@mail.ru, M.A. Vilner¹, Graduate Student,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The article contains justification of the parameters of numerical model for assessing development of the stress-strain state. Modelling is based on the geometric parameters of the mine located in the dynamic impact influence zone. The model is based on the Johnson-Holmquist equations and takes into consideration the formation of intense fracturing zones in the vicinity of the mine, the speed and nature of the load application. In this case, the seismic event is considered as a point explosion. As a result, the dependence of various factors from the intensity of the dynamic impact was derived. The factors are the manifestation of geodynamic and geomechanical processes, the displacement of the mining working contour and the possibility of rock burst.

Key words: dynamic impact, geomechanics, brittle rock, damage constitutive model, blast, stress-strain state, stability.