

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.275

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ РУДНИКА ЗУУНЦАГААН ПОД КАРЬЕРОМ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Т. К. М. Динтве, Т. Сасаока, Х. Шимада, А. Хаманака, Д. Мозес

Университет Кюсю,
E-mail: dintwel8r@mine.kyushu-u.ac.jp, 819-0395, г. Фукуока, Япония

Исследовано влияние технологий подземной добычи на устойчивость массива в условиях рудника Зуунцагаан (Монголия). Рассмотрены два варианта технологии отработки: развитие горных работ “снизу вверх” и “сверху вниз”. Для каждого варианта выполнена оценка устойчивости выработок в шахте и бортов карьера. Показано, что при добыче “сверху вниз” наблюдается меньшее смещение массива на участке подземных работ. На участке открытых работ влияние обеих технологий относительно одинаково.

Технология открытой и подземной добычи, комбинированная отработка, устойчивость бортов карьера, численное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20220105

Развитие методов и технологий добычи полезных ископаемых привело к возможности обеспечения перехода горных работ с открытых на подземные способы разработки одного и того же рудного месторождения. Обычно данный переход обуславливается экономическими преимуществами подземной добычи по сравнению с открытой при достижении определенной глубины. Переход от открытой добычи к подземной достаточно распространен во всем мире при разработке различных рудных месторождений. Однако он требует большего внимания к данным о состоянии массива горных пород и к другим влияющим факторам. Комбинированная добыча может осуществляться в следующих формах: одновременная добыча открытым и подземным способами; подземная добыча под карьером; открытая добыча над существующей шахтой [1].

В случае подземной добычи под карьером, который рассматривается в данной работе, следующим шагом после изучения всех факторов, влияющих на окончательную границу карьера с геологической и экономических точек зрения [2, 3], является определение подходящего способа подземной добычи [4]. В ходе выбора способа подземной добычи, кроме обеспечения повышения прибыли, учитывается также безопасность и устойчивость выработанного пространства.

Выбранный способ добычи необходимо проверить в конкретных условиях: сформированных напряжениях, деформированном состоянии массива пород и, что наиболее важно, при наличии карьера сверху. Обрушение борта карьера из-за подземной добычи приводит к остановке горных работ, а также оказывает негативное влияние на производственную и социальную инфраструктуру. Изучение устойчивости массива пород при комбинированной добыче выполняется с помощью численного моделирования в сочетании с традиционными методами, такими как эмпирический и аналитический. Численное моделирование обеспечивает возможность учета сложности массива горных пород, его гетерогенной, анизотропной и неравномерной природы. Если входные данные верны, то этот метод дает надежные решения почти на всех стадиях проектирования рудника, включая этап его закрытия. Для большей надежности результатов численного моделирования необходимо их сопоставление с данными полевых испытаний. В ходе предварительного анализа количество необходимых данных ограничено, для оценки и прогнозирования используются только доступные на текущий момент данные. При исследовании перехода от открытой к подземной добыче в [5, 6] применялось программное обеспечение с целью моделирования методом конечных элементов и изучения влияния подземной добычи на устойчивость бортов карьера, расположенного выше. В [7] сочетанием методов конечных и дискретных элементов оценивалась неустойчивость бортов карьера, возникшая в результате блочного обрушения. При выборе метода добычи в [8] с помощью программного обеспечения FLAC 3D моделировался процесс выемки рудной массы из висячего бока, расположенного ниже борта карьера, и определялась технология добычи с минимальным уровнем риска при обеспечении устойчивости массива. В рамках изучения перехода от открытой к подземной добыче в [9] показано, что технология подземной добычи — наиболее значимый параметр из всех рассмотренных.

В настоящей работе использован метод численного моделирования для выбора технологии подземной добычи под карьером. Рассматриваемый флюоритовый рудник Зуунцагаан расположен в Монголии, где с 2007 г. проводится открытая добыча и на современном этапе происходит переход к подземной добыче подэтажным обрушением под открытым выработанным пространством (SLOS). Численное моделирование позволяет оценить влияние каждой из технологий добычи на напряжения и деформации, а также выбрать наиболее рациональную.

ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДНИКА

Для проведения исследований из плана добычи взята геотехническая модель рудника, в которой отражены его геотехнические характеристики: состояние массива пород, локальные напряжения, мощность потолочного целика, оседание бортов карьера. Наличие карьера над шахтой изменяет локальные напряжения. Вызванные подземной добычей напряжения способны негативно влиять на устойчивость бортов карьера. Мощность потолочного целика должна быть достаточной для обеспечения безопасности на поверхности и под землей. Разрушение потолочного целика способно привести к общему катастрофическому обрушению горных пород в шахте, а также к оползням, разрушениям выработок и бортов и в конечном итоге к осадке поверхностных пород. Более того, в регионах с холодным климатом мощность потолочного целика должна быть достаточной для тепловой изоляции подземных выработок от крайне низких температур на поверхности [10, 11]. Мощность и другие геометрические параметры потолочного целика, межэтажных целиков и выработок определяются на основе состояния массива руды и вмещающих пород, а также технологии добычи. Однако возникает проблема того, что некоторое количество руды останется в целиках.

В данной геотехнической модели технология добычи обуславливается контролем за распределением напряжений, что является ключевым аспектом проектирования процесса добычи [12]. При планировании необходимо выбрать ту технологию, которая позволяет контролировать состояние массива пород с точки зрения распределения напряжений и результирующих смещений. На выбор технологии добычи также влияет использование крепи и других методов укрепления массива. Таким образом, при рассмотрении технологии добычи “снизу вверх” необходимо учитывать, что закладочный материал будет выполнять не только функцию поддержки налегающих пород, но и функцию подошвы для последующих этажей [13]. К основным факторам планирования горных работ относятся затраты на закрепление массива, в частности на использование цементного закладочного материала. В данном случае переход от открытой добычи к подземной — это часть параметров, влияющих на устойчивость потолочного целика. Применение той или иной технологии добычи приводит к перераспределению напряжений, в результате чего в окрестности поверхности образуются высокие напряжения, влияющие на потолочный целик. В идеальном случае напряжения в окрестности поверхности должны поддерживаться на низком уровне во избежание их концентрации в пределах потолочного целика.

Состояние массива пород характеризуется данными, которые были собраны при геотехническом картографировании поверхности и анализе кернов по системам классификации массивов горных пород. В ходе геотехнического картографирования отмечены большие и малые геологические образования, которые впоследствии внедрены в геотехническую модель. Падение малых образований в пределах изучаемой геотехнической области представлены крупными разрывными нарушениями. При переходе к подземной добыче данные нарушения должны воздействовать на параметры выработок таким образом, чтобы избежать их взаимного влияния. В процессе добычи вызванные напряжения могут провоцировать в этих местах смещения, которые накапливаются, приводя к значительным разрушениям. Следовательно, необходимо выбрать подходящую технологию добычи, чтобы контролировать распределение напряжений. В [14, 15] показано, что геологические образования влияют на распространение разрушений в ходе перехода от открытой добычи к подземной. Для изучения гетерогенной природы массива применяются данные, полученные в ходе картографирования поверхности и анализа кернов в районе рудника Зуунцагаан. Массив пород характеризуется по рейтингам массива горных пород (RMR) и качества массива горных пород (RMQR) — 67 и 66 баллов соответственно [16]. Эквивалент индекса геологической прочности (GSI) рейтинга массива горных пород определен с помощью программного обеспечения Roclab, полученные значения параметров массива использованы для построения модели.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Геотехническая модель рудника построена в программе FLAC 3D. Как и на реальном руднике, в модели представлены массивы нетронутых пород, открытой и подземной выемки. Размеры модели определены на основе фактической горнопромышленной области и составляют $1200 \times 600 \times 300$ м. Модель разбита на 290 000 участков (рис. 1). На участке подземных работ расположено рудное тело со средней мощностью 10 м, для которого выбрана продольная конфигурация SLOS. Длина простирания рудного тела ~ 200 м, направление 25° на северо-восток, средний угол падения 70° . Глубина рудного тела по падению, предназначенного

к выемке, составляет ~ 100 м. Область подземной добычи состоит из трех этажей, которые разделены межэтажными целиками. В каждом этаже расположены выработки длиной 20 м и высотой 10 м. Разрабатывались основные первичные выработки, проводилась их закладка, затем выполнялись дополнительные вторичные выработки. Каждая из технологий добычи “сверху вниз” и “снизу вверх” рассматривалась при одинаковых условиях для корректной оценки результатов. Также изучено состояние карьера над существующей шахтой после удаления межэтажного целика. Цель проверки — изучение необходимости применения межэтажных целиков.

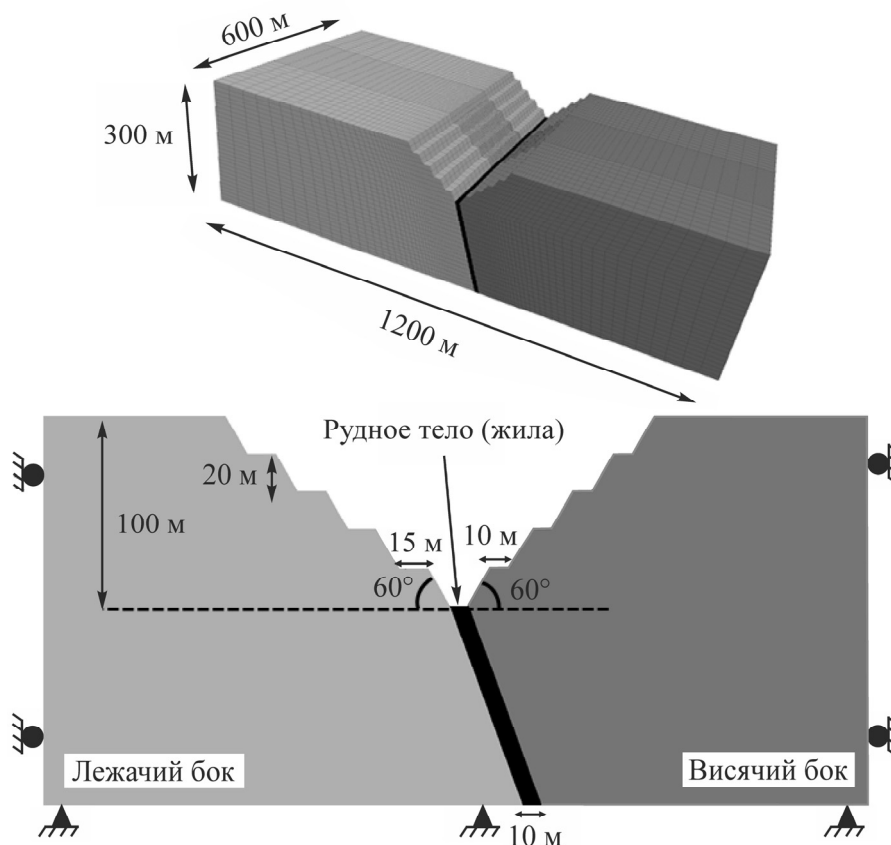


Рис. 1. Геометрические параметры трехмерной модели карьера и рудного тела

Между участками открытых и подземных работ оставлен потолочный целик мощностью 15 м (рис. 2а). Для анализа реакции массива на горные работы в областях, представляющих интерес, расположены точки мониторинга вдоль бортов карьера и стенок выработок (рис. 2б). Границы модели установлены на значительном расстоянии от участков горных работ во избежание их влияния на результаты моделирования. Начальное напряженно-деформированное состояние рассчитано на основе фокального механизма Айдана [17, 18]. Горизонтальные напряжения меньше в 0.7 раза вертикальных. Коэффициент горизонтальных напряжений при построении модели установлен 0.7. По бокам модель ограничена подвижными границами, позволяющими осуществлять вертикальное смещение, снизу закреплена во всех направлениях. Гравитационная нагрузка приложена строго вертикально. Для всех групп пород применен прочностной критерий Мора–Кулона и принято, что породы имеют упругопластическое поведение.

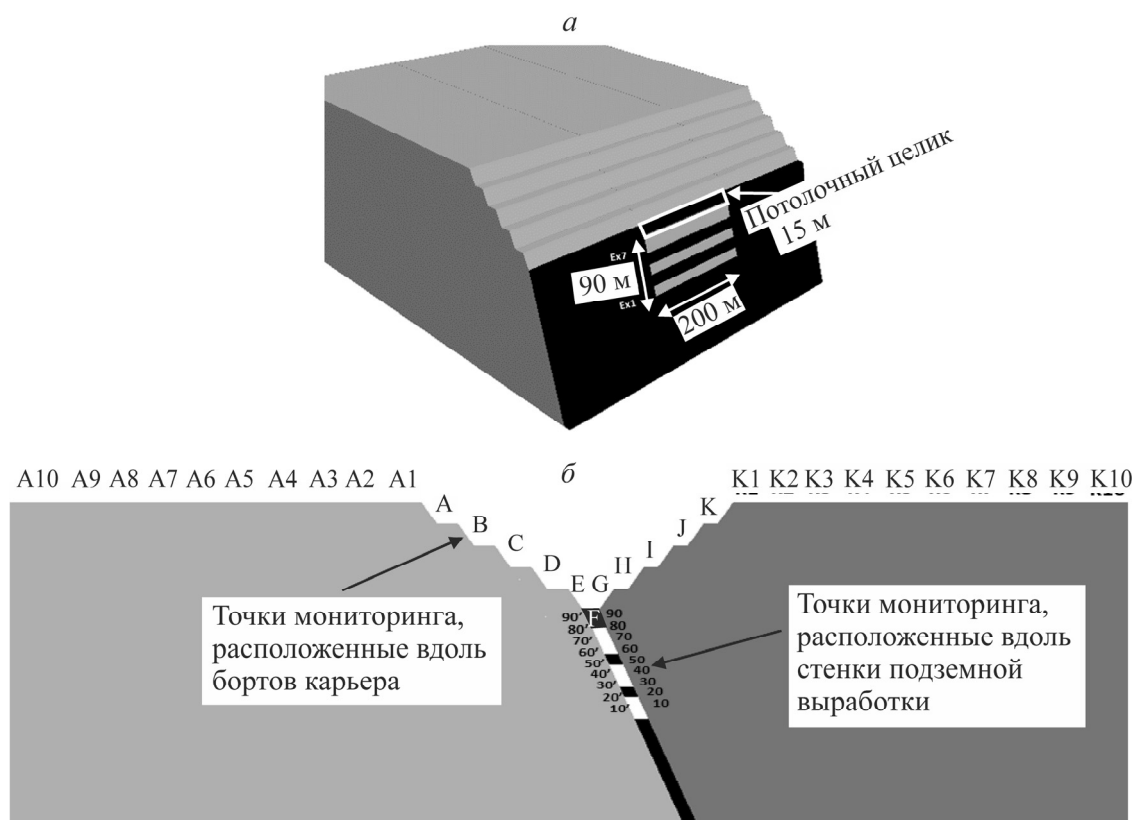


Рис. 2. Структура модели (а) и расположение точек мониторинга вдоль бортов карьера и стенок подземной выработки (б)

Соответствующие значения критерия Мора – Кулона представлены в таблице.

Физико-механические свойства массива пород

Параметр	Лежащий бок	Висячий бок	Рудное тело
GSI	62	62	62
E_{rm} , ГПа	13.350	12.300	13.350
σ_{cm} , МПа	13.200	9.800	9.000
c , МПа	2.100	1.770	1.720
σ_i , МПа	0.277	0.277	0.190
ϕ , град	58.600	54.500	56.200
Значение эквивалента критерия Мора – Кулона			
m_i	25	20	25
m_b	3.170	2.140	3.170
s	0.004	0.004	0.004

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнено моделирование двух традиционных технологий добычи и одной без возведения межэтажных целиков. Полученные результаты моделирования сравнивались между собой и анализировались с точки зрения смещений массива пород, распределения напряжений и расположения областей пластичности. Напряжения проанализированы на участке как открытых работ, так и подземных. Распределение горизонтальных напряжений показало, что на всех

точках мониторинга значительных различий между технологиями добычи “сверху вниз” и “снизу вверх” не обнаружено, тогда как при отсутствии межэтажных целиков концентрация напряжений на дне карьера меньше на ~1 МПа по сравнению с другими технологиями добычи (рис. 3а). В общем случае горизонтальное напряжение увеличивается при приближении ко дну карьера и немного выше на стороне висячего бока в области пяты борта. При использовании технологий добычи с межэтажными целиками (“сверху вниз” и “снизу вверх”) на точках мониторинга наблюдаются меньшие вертикальные напряжения. Максимальные вертикальные напряжения отмечены на пятах бортов карьера при всех технологиях добычи, на дне карьера вертикальные напряжения почти равны нулю (рис. 3б). Вертикальные напряжения в области висячего бока значительно выше, чем в области лежачего бока.

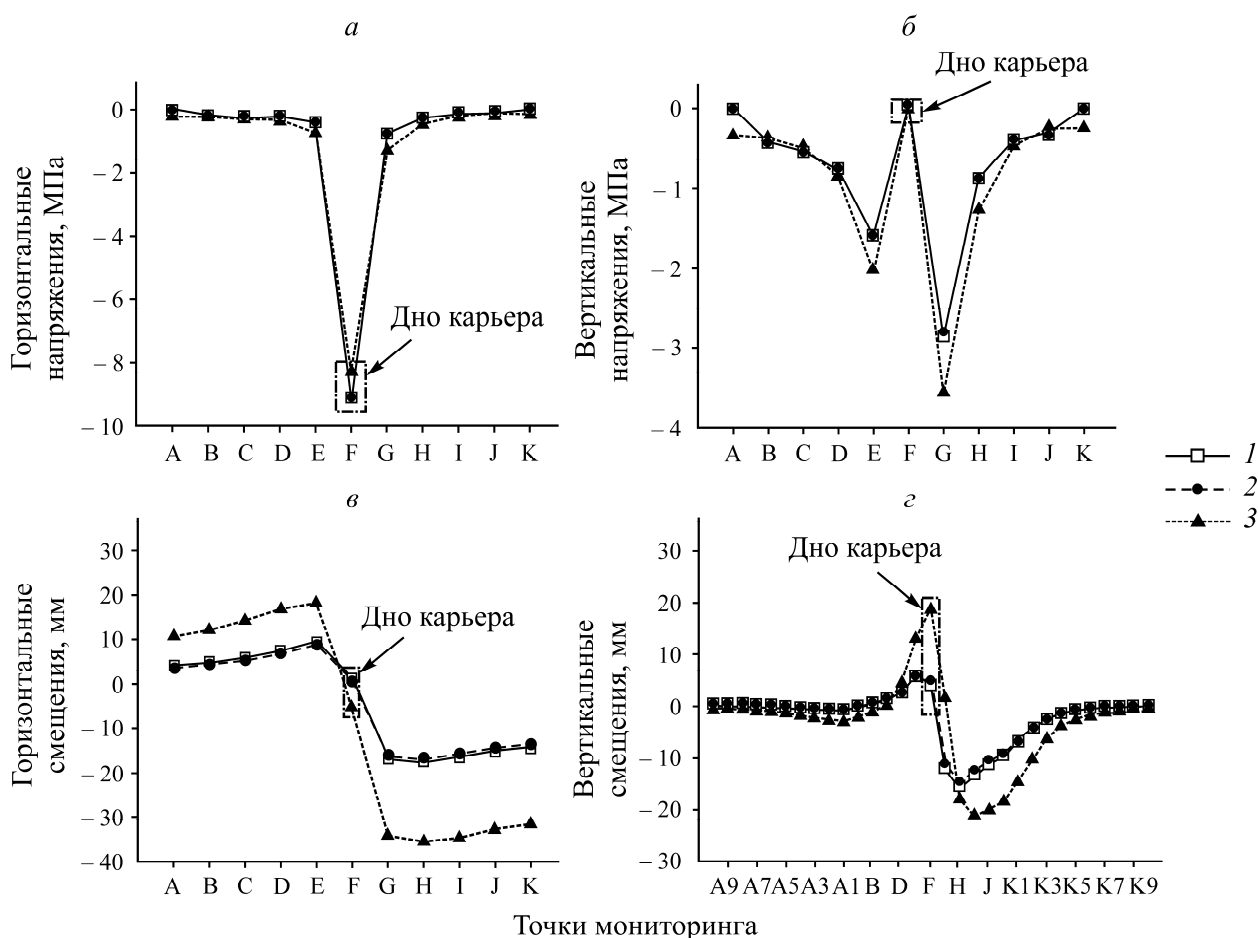


Рис. 3. Распределение напряжений и смещений массива пород на участке открытых работ: а — горизонтальные напряжения; б — вертикальные напряжения; в — горизонтальные смещения; г — вертикальные смещения; 1 — технология добычи “сверху вниз”; 2 — технология добычи “снизу вверх”; 3 — технология добычи без возведения межэтажных целиков

Горизонтальные смещения на участке открытых работ при добыче “сверху вниз” и “снизу вверх” относительно одинаковы и значительно ниже, чем при отсутствии межэтажных целиков (рис. 3в). Это подтверждает, что осадка бортов карьера будет больше, если не использовать межэтажные целики в ходе подземной добычи. Анализ осадки выявил, что при наличии межэтажных целиков происходит меньшая осадка в области висячего бока. Такие же результаты наблюдаются в области лежачего бока и дна карьера, где вертикальные смещения ниже при технологиях добычи “сверху вниз” и “снизу вверх” (рис. 3г).

На рис. 4 представлено распределение горизонтальных и вертикальных напряжений на участке подземных работ вдоль стенок выработок со стороны висячего и лежачего боков. Распределение напряжений при технологии добычи с отсутствием межэтажных целиков постоянно до последних двух стадий добычи, когда напряжение резко увеличилось до -23 МПа в области лежачего бока и до -11 МПа в области висячего. Распределения напряжений при технологиях добычи “сверху вниз” и “снизу вверх” одинаковы на нижних выработках. Тем не менее напряжение резко увеличивается в области висячего бока и в области лежачего, в двух крайних точках мониторинга ниже потолочного целика. Максимальные горизонтальные смещения при технологиях добычи “сверху вниз” и “снизу вверх” на данных точках составили -5.1 и -17.0 МПа (лежащий бок) и -4.6 и -6.7 МПа (висячий бок). Подобное наблюдение выполнено за распределением вертикальных напряжений. При технологии с отсутствием межэтажных целиков после первой точки напряжение уменьшается и стабилизируется до крайних двух точек мониторинга, где происходит увеличение. При технологии добычи “сверху вниз” получено меньшее вертикальное напряжение -2.8 МПа на двух крайних точках мониторинга в области лежачего бока, тогда как в области висячего бока — наименьшее вертикальное напряжение (-1.6 МПа) при технологии добычи “снизу вверх”.

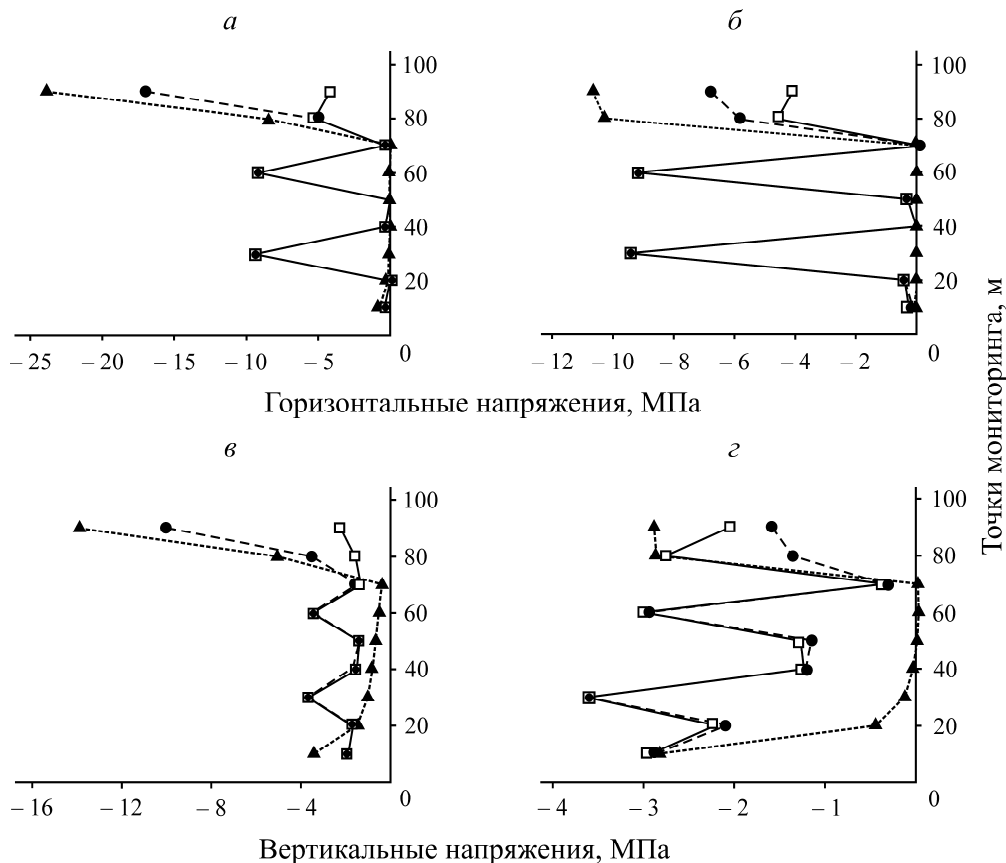


Рис. 4. Распределение напряжений в массиве пород на участке подземных работ: *а, б* — горизонтальные напряжения соответственно в лежачем и висячем боку; *в, г* — вертикальные напряжения соответственно в лежачем и висячем боку. Технология добычи: 1 — “сверху вниз”; 2 — “снизу вверх”; 3 — без возведения межэтажных целиков

На рис. 5а смещения массива на участке подземных работ отражают напряжения, присутствующие в стенках выработок. При технологии добычи без оставления межэтажных целиков горизонтальные смещения имеются в области как лежачего, так и висячего бока. Они постепенно увеличиваются с самого низа до крайней точки мониторинга, где достигают максимального значения. Технологии добычи “сверху вниз” и “снизу вверх” имеют небольшие различия от точки к точке с обоих боков выработки. В крайней точке наблюдается максимальное различие смещений в области висячего бока: 10 мм “сверху вниз” и 65 мм “снизу вверх” (рис. 5б). На рис. 5в, г представлены вертикальные смещения на участке подземных работ. При технологии добычи без оставления межэтажных целиков отмечаются смещения, увеличивающиеся от самой нижней точки мониторинга до самой верхней, в области висячего бока — изгиб (рис. 5г). Он возник из-за высоких напряжений в нижней и верхней частях стенки выработки, тогда как середина стенки испытывает низкое напряжение (рис. 4з). Результирующие смещения, возникшие при технологиях добычи “сверху вниз” и “снизу вверх”, одинаковы в некоторых местах средней области подземной добычи. Наибольшие различия — в нижней и верхней точках мониторинга. Это объясняется тем, что они являются точками начала и окончания выемочных работ. В общем случае смещения в висячем боку больше, чем в лежачем при всех технологиях добычи. При технологии добычи “сверху вниз” происходят меньшие смещения, чем при технологиях “снизу вверх” и без оставления межэтажных целиков, особенно в окрестностях потолочного целика, где важно иметь меньшую деформацию. Установлено, что наиболее подходящая технология подземной добычи — технология “сверху вниз”.

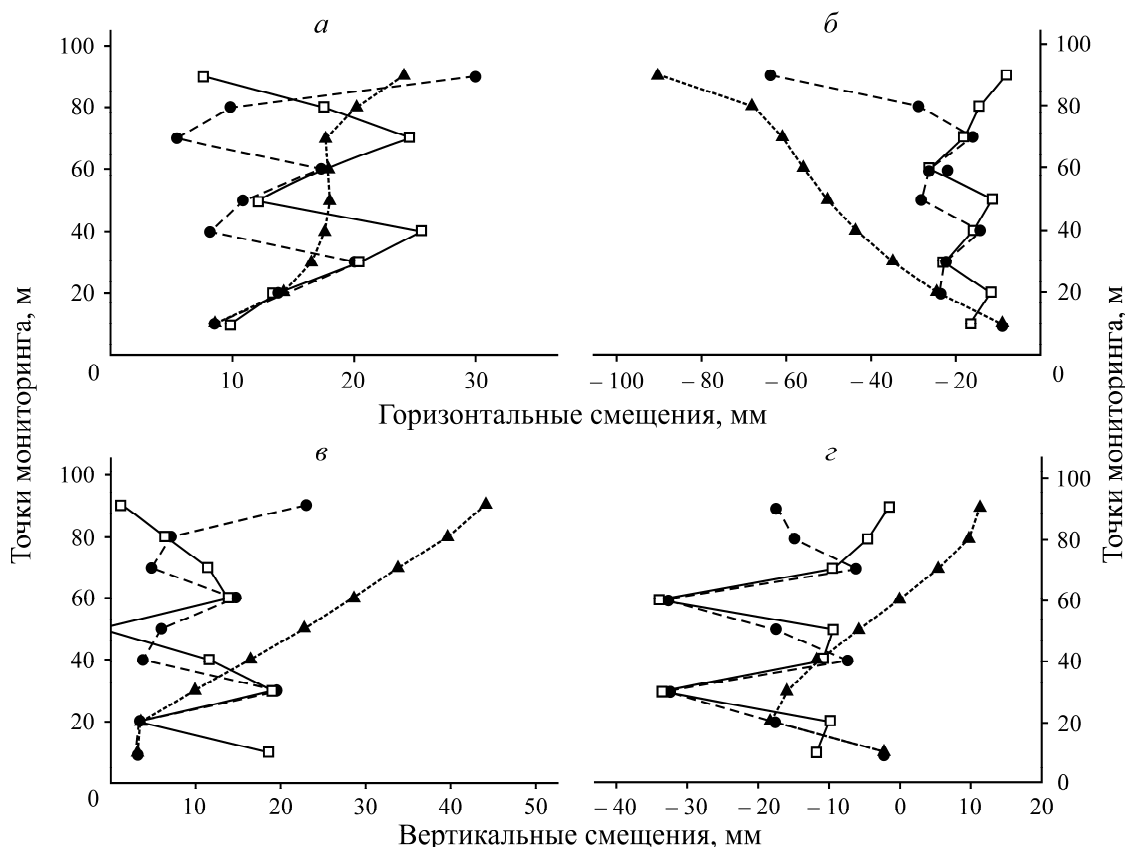


Рис. 5. Распределение смещений в массиве пород на участке подземных работ: а, б — горизонтальные смещения соответственно в лежачем и висячем боку; в, г — вертикальные смещения соответственно в лежачем и висячем боку. Технология добычи: 1 — “сверху вниз”; 2 — “снизу вверх”; 3 — без возведения межэтажных целиков

На рис. 6 представлены зоны пластичности при технологиях добычи “сверху вниз” и “снизу вверх”. Расположение зон пластичности почти одинаковы в обоих случаях, они сконцентрированы вдоль стенок выемки, сверху и снизу межэтажных целиков и вокруг пяты бортов. Различие заключается в том, что при технологии добычи “сверху вниз” области пластичности стремятся увеличиваться в направлении вниз (рис. 6а), при технологии добычи “снизу вверх” — вверх (рис. 6б).

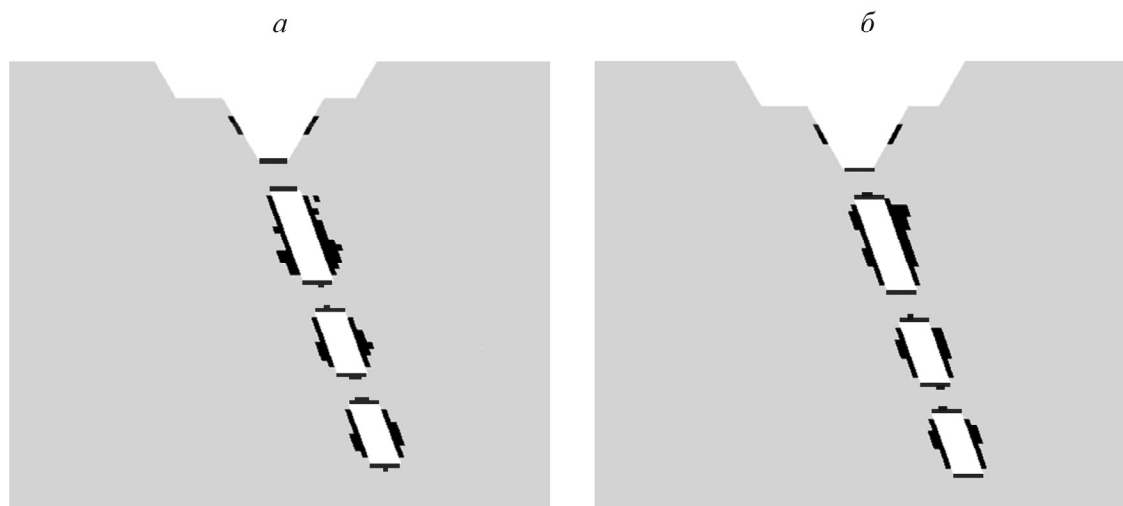


Рис. 6. Образование зон пластичности вокруг подземных выработок и бортов карьера

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ технологий подземной добычи руды из наклонного рудного тела, расположенного ниже карьера с целью выбора наиболее подходящего варианта отработки. Возможная технология может быть внедрена для добычи флюорита методом SLOS. Разработана трехмерная численная модель, выбраны показатели устойчивости массива пород, такие как напряжения, смещения и зоны пластичности. В ходе анализа выполнено сравнение полученных смещений и распределения напряжений.

Показано, что на участке подземных работ технология добычи “сверху вниз” при текущем состоянии рудника приводит к меньшим смещениям, чем технология добычи “снизу вверх” или технология добычи без оставления межэтажных целиков в области как висячего, так и лежащего бока.

На смещение участка открытых работ обе технологии добычи влияют идентично — наблюдаются одинаковые смещения массива. Технология добычи без оставления межэтажных целиков больше влияет на сдвиг массива.

Концентрация напряжений расположена в области пяты бортов непосредственно под потолочным целиком на участке подземных работ. В данных областях зафиксированы значительные смещения. Висячий бок подземной выработки и борта карьера больше подвержены влиянию добычи, чем лежащий бок.

Внедрение технологии добычи “сверху вниз” рекомендовано для разработки рудного тела на руднике Зуунцагаан. Однако после начала подземных работ требуется анализ данных мониторинга для подтверждения корректности построенной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hamman E., Cowan M., Venter J., and Souza J.** Considerations for open pit to underground transition interaction, *Int. Symp. on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, editor. Slope Stab, Perth, 2020. — P. 1123–1138.
2. **Bakhtavar E., Shahriar K., and Oraee K.** Transition from open-pit to underground as a new optimization challenge in mining engineering, *J. Min. Sci.*, 2009, Vol. 45, No. 5. — P. 485–494.
3. **Bakhtavar E.** Transition from open-pit to underground in the case of Chah-Gaz iron ore combined mining, *J. Min. Sci.*, 2013, Vol. 49, No. 6. — P. 955–966.
4. **Eremenko A. A., Klishin V. I., Eremenko V. A., and Filatov A. P.** Feasibility study of a geotechnology for underground mining at Udachnaya kimberlite pipe under the opencast bottom, *J. Min. Sci.*, 2008, Vol. 44, No. 3. — P. 271–282.
5. **Eremenko A. A., Seryakov V. M., and Filatov A. P.** Estimate of the rockmass stress state in the course of mining the reserves subjacent the open pit bottom at the “Udachnaya” pipe, *J. Min. Sci.*, 2007, Vol. 43, No. 4. — P. 361–369.
6. **Karakus M., Zhukovskiy S., and Goodchild D.** Investigating the influence of underground ore productions on the overall stability of an existing open pit, *Procedia Eng.*, 2017, Vol. 191. — P. 600–608.
7. **Vyazmensky A., Stead D., Elmo D., and Moss A.** Numerical analysis of block caving-induced instability in large open pit slopes: A finite element/discrete element approach, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2010, Vol. 43, No. 1. — P. 21–39.
8. **Liu K., Zhu W., Wang Q., Liu X., and Liu X.** Mining method selection and optimization for hanging-wall ore-body at Yanqianshan iron mine, China, *Geotech. Geol. Eng.*, 2017, Vol. 35, No. 1. — P. 225–241.
9. **Mohanto S. and Deb D.** Prediction of plastic damage index for assessing rib pillar stability in underground metal mine using multi-variate regression and artificial neural network techniques, *Geotech. Geol. Eng.*, 2020, Vol. 38, No. 2. — P. 767–790.
10. **Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Y. G., and Baranovsky K. V.** Rational design of ore discharge bottom in transition from open pit to underground mining in udachny mine, *J. Min. Sci.*, 2013, Vol. 49, No. 1. — P. 90–98.
11. **Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Y. G., Nikitin I. V., and Tishkov M. V.** Substantiation of protective cushion thickness in mining under open pit bottom with the caving methods at udachnaya pipe, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 2. — P. 226–236.
12. **Potvin Y. and Hudyma M.** Open stope mining in Canada, *Massmin 2000*, Brisbane, 2000. — P. 661–674.
13. **Villaescusa E.** Geotechnical design for sublevel open stoping, 2014. — 541 p.
14. **Campbell A., Mu E. A., and Lilley C.** Cave propagation and open pit interaction at the Ernest Henry mine, 7th Int. Conf. Mass Min., Sydney, 2016. — P. 1–16.
15. **Brummer R. K., Li H., and Moss A.** The transition from open pit to underground mining: an unusual slope failure mechanism at Palabora, South Afr. *Inst. Min. Metall. Int. Symp. Stab. Rock Slopes Open Pit Min. Civ. Eng.*, 2006. — P. 411–420.
16. **Bieniawski Z. T.** Engineering classification of jointed rock masses, 1973. — P. 353–343.
17. **Aydan Ö.** An stress inference method based on structural geological features for the full-stress components in the earth crust, *Yerbilimleri*, 2000. — P. 223–236.
18. **Aydan Ö.** An integrated approach for the evaluation of measurements and inferences of in-situ stresses, *ISRM, Tampere: Int. Soc. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2016.

Поступила в редакцию 14/IV 2021

После доработки 07/IX 2021

Принята к публикации 24/XII 2021