

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ЦЕЛИКА ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА

Сергей Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией подземной разработки рудных месторождений, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Юрий Николаевич Шапошник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Александр Михайлович Никольский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, e-mail: nikosya@mail.ru

Выполненный комплекс исследований в рамках настоящей статьи посвящен геомеханической оценке безопасной отработки запасов руды, в том числе барьерных целиков, в границах предохранительного (охранного) целика ствола РЭШ Иртышского рудника с определением степени влияния возникающих напряжений и деформаций в массиве пород на его состояние, а также капитальные выработки и земную поверхность.

Вследствие отсутствия активного воспроизводства запасов минерального сырья на действующих рудниках вопросы повторной разработки целиков становятся чрезвычайно актуальными. Установлено, что потери в границах предохранительных целиков под охраняемые объекты на некоторых месторождениях достигают 30 и более процентов от балансовых запасов.

На основе аналитических решений и трехмерного математического моделирования методом конечных элементов применительно к условиям Иртышского рудника обоснована возможность безопасной выемки части запасов предохранительного целика ствола РЭШ без отрицательных последствий на его эксплуатацию, а также объекты, расположенные на дневной поверхности.

Наиболее значимым в публикации, с позиции решения поставленной задачи, является использование наряду с нормативной документацией математического моделирования, которое с учетом геолог-структурных особенностей месторождения, литологии массива, физико-механических свойств пород и геометрической (конструктивной) сложности горных объектов существенно расширяет знания в изучении вопросов оценки устойчивости выработок и состояния земной поверхности.

Установлено, что при погашении запасов предохранительного целика следует в качестве основной меры охраны для обеспечения сохранности ствола РЭШ оставлять рудные барьерные целики.

Ключевые слова: горный массив, предохранительный целик, напряжения, деформации, устойчивость, геотехнология, безопасность.

ANALYSIS OF SOLID STRESS-STRAIN BEHAVIOR WHEN PROTECTIVE PILLAR OF VERTICAL SHAFT IS DEVELOPED

Sergey A. Neverov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Head of Underground Ore Deposit Development Laboratory, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Yuri N. Shaposhnik

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Physical and Technical Geo-Technologies, e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Alexander M. Hikolsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Underground Coal Deposit Development Laboratory, e-mail: nikosya@mail.ru

In the context of the paper, carried out study complex is devoted to geomechanical estimation of safe development of ore reserves including barrier pillar within protective pillar of shaft of Irtishskaya Ore Mine with determination of influence rate of occurring stresses and strains in a solid on its condition and on capital workings and ground surface.

Due to absence of active reserve reproduction of mineral raw materials at active ore mines, issues of pillar redevelopment become extremely important. It is established that in some deposits, losses in boundaries of protective pillars for protective objects reach 30 and more percent from balanced reserves.

The possibility of safe extraction of parts of reserves from protective pillar of shaft without negative consequences for mine operation and for objects located at daylight surface is justified, based on analytical solutions and finite-element simulation in terms of Irtishskaya Mine.

The most significant issue in the paper is using of mathematical simulation considering geo-structural features of the deposit, solid lithology, physical and mechanical properties of rock geometrical difficulty of mining objects and regulatory documentation for significant of extension of knowledge about studying of stability estimation of workings and ground surface.

It is established that as main safety way for mine shaft ore barrier pillars should be leaved when reserves from protective pillar is depleted.

Key words: solid, protective pillar, stresses, strains, stability, geo-technology, safety.

Введение

Известно, что одной из основных горных мер охраны вскрывающих вертикальных стволов от влияния очистной выемки является оставление предохранительных (охранных) целиков [1-5]. На большинстве действующих рудных месторождений в них сосредоточено до 30 % подтвержденных балансовых запасов. Весьма сложные горно-геологические условия залегания рудных залежей и уменьшение объемов вскрытых запасов с ростом глубины заставляют изыскивать пути решения проблемы восполнения сырьевой базы. В данных условиях повторная разработка ранее оставленных целиков, в том числе, охранных, является востребованной, требующей более качественной проработки и обоснований технических решений по их извлечению [6-9].

В настоящее время единственным способом безопасной отработки данного рода целиков является использование систем разработки с закладкой выработанного пространства. С одной стороны, данные технологии практически исключают отрицательное влияние горного давления на капитальные выработки, а также опасные деформации земной поверхности, с другой – непомерный рост стоимости твердеющей закладки при малой и средней ценности руд делает невозможным обеспечить эффективную отработку запасов. Поэтому, разработка технических решений по безопасной выемке данного рода целиков является весьма ответственной задачей [10-14].

В настоящей статье применительно к стволу РЭШ Иртышского рудника приводится комплекс исследований, направленных на обоснование технической возможности отработки части запасов охранного целика системами без закладки с оставлением только ряда барьерных целиков (БЦ).

Горнотехническая ситуация и методы решения задач

Для решения поставленных задач была разработана параметрическая 3-D модель горнотехнической ситуации в районе ствола РЭШ, включающая выработки откаточных горизонтов № 0-13, выработанные пространства, образованные от ведения горных работ между горизонтами № 0-13, вертикальные вскрывающие выработки, междукамерные (МКЦ), междуэтажные (МЭЦ) и барьерные (БЦ) целики.

Для выбора порядка, последовательности и участков отработки запасов предохранительного целика были рассмотрены 3 сценария очистной выемки:

1 сценарий – оценка степени влияния напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород на ствол РЭШ и дневную поверхность выемкой камерных запасов системами подэтажных штреков и магазинированием руды, а также междукамерных МКЦ и барьерных БЦ-3, 4, и 5 целиков технологией этажного обрушения с ликвидацией открытых камер на 10-13 горизонтах в границах предохранительного целика ствола РЭШ с оставлением междуэтажных целиков МЭЦ (рис. 1).

2 сценарий – (предельный случай) выемка запасов системами подэтажных штреков и магазинированием руды, а также междукамерных МКЦ, междуэтажных МЭЦ и барьерных БЦ целиков технологией этажного обрушения с ликвидацией выработанного пространства на 9-13 горизонтах в границах предохранительного целика ствола РЭШ (погашение запасов предохранительного целика ствола РЭШ в интервале глубин 9-13 горизонтов с подработкой вышележащих выработок и собственно дневной поверхности).

3 сценарий (аналогичен 2-му сценарию) – предполагает рассмотрение горнотехнической ситуации, при которой осуществляется погашение запасов предохранительного целика ствола РЭШ в интервале глубин 9-13 горизонтов с оставлением только барьерных целиков БЦ-3, 4 и 5 (рис. 2).

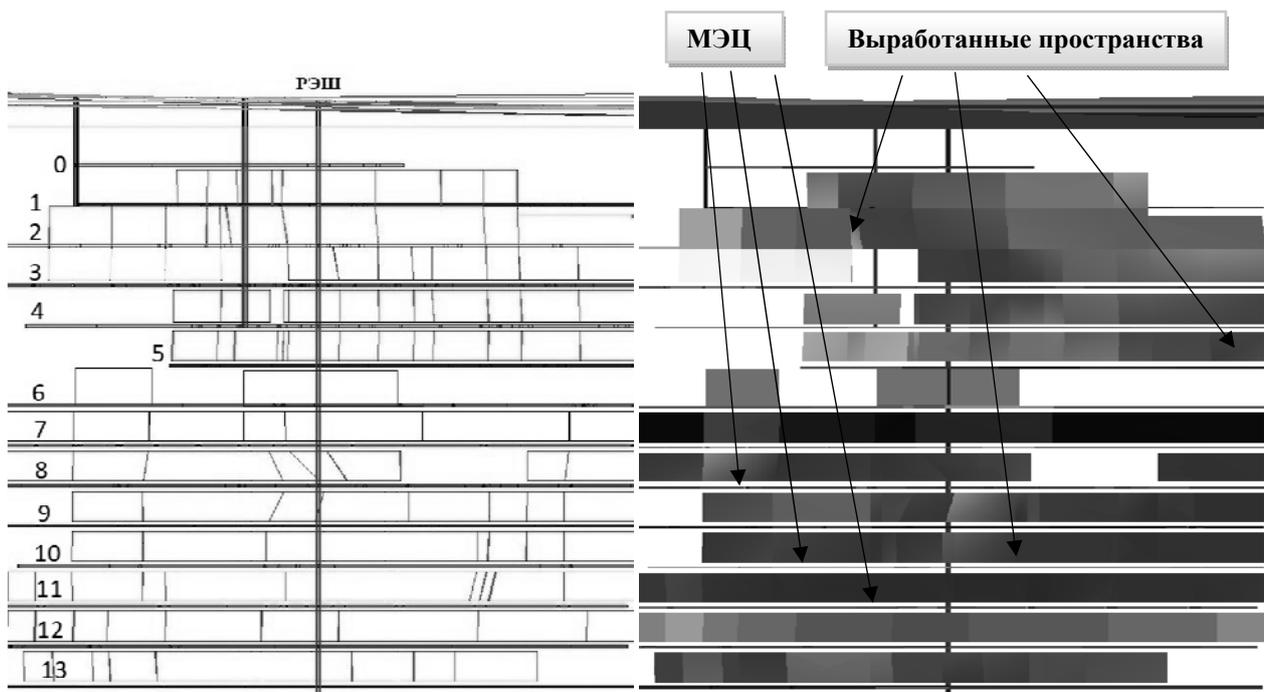


Рис. 1. Сценарий № 1. Вариант погашения запасов руды в границах охранного целика ствола РЭШ до 13-го горизонта без оставления барьерных целиков БЦ при наличии целиков МЭЦ (высота между горизонтами 50 м)

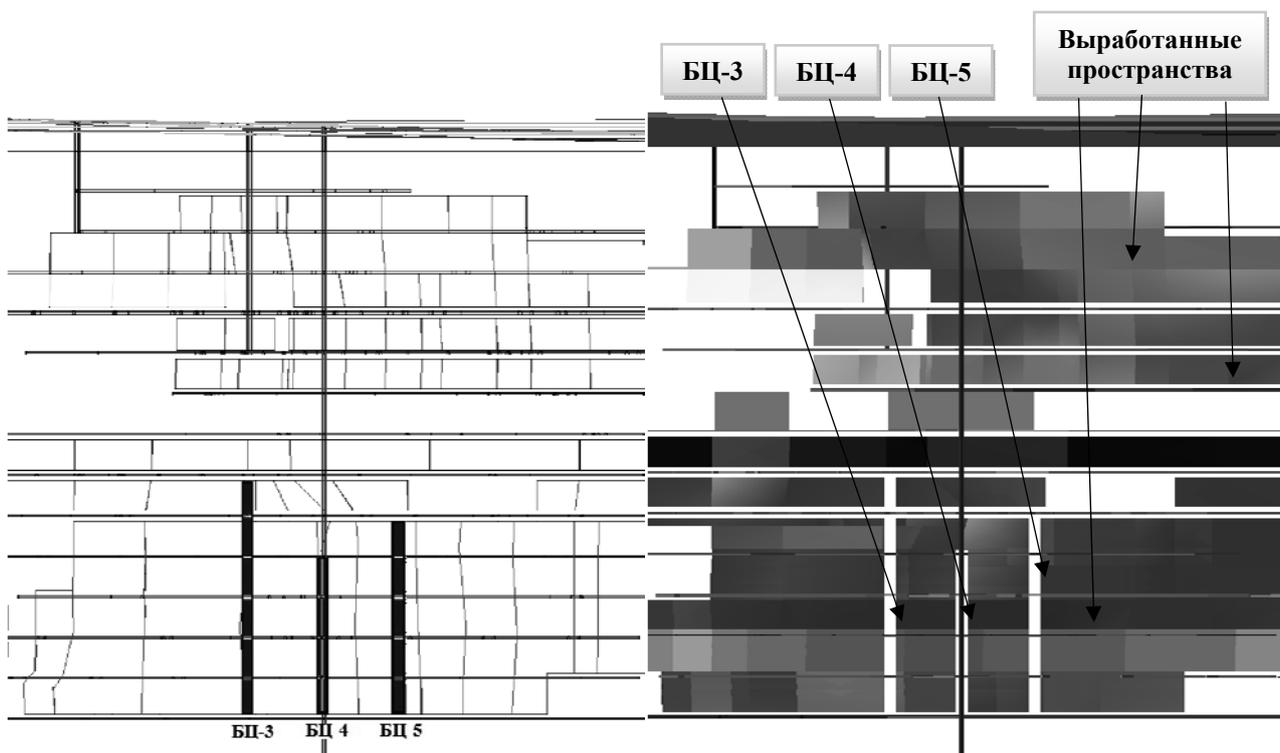


Рис. 2. Сценарий № 3. Вариант погашения запасов руды в камерах, МКЦ, МЭЦ в границах предохранительного целика ствола РЭШ в интервале глубин 9-13 горизонтов с оставлением барьерных целиков БЦ-3, 4 и 5

На рис. 3, 4 представлена визуализация полученных результатов (распределение напряжений) по характерным сечениям (разрезам) как в вертикальной плоскости по простиранию, вкрест простирания, так и в плане по горизонтам 9-13:

- по центру барьерных целиков вкрест простирания (сечения 1-3);
- сечение вкрест простирание залежи по стволу РЭШ – разрез 2, по простиранию – разрез II);
- сечения вкрест простирания по вентиляционным шурфам – разрезы 3-4, по простиранию – разрезы I, III);
- в породах лежачего бока (сечение по простиранию залежи IV).

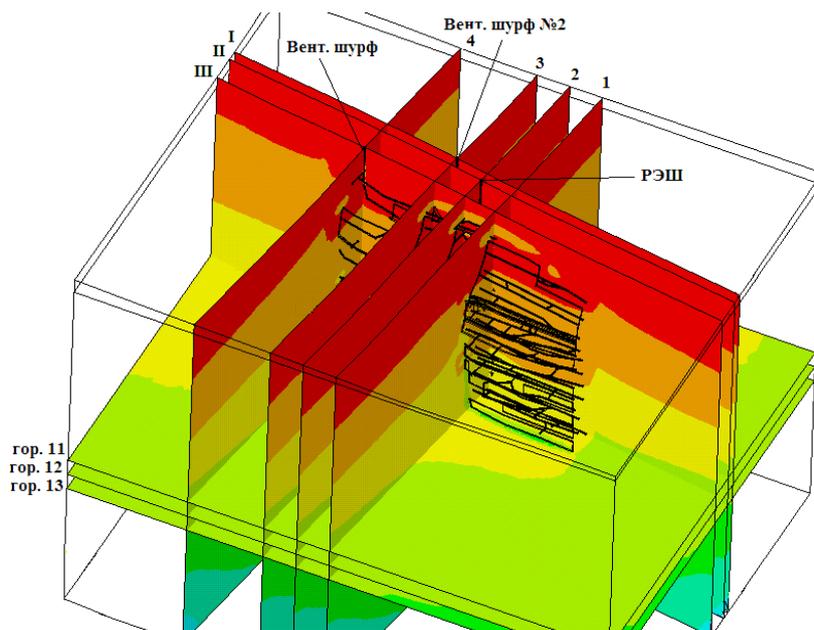


Рис. 3. Общий вид разрезов и планов в границах геомеханической модели

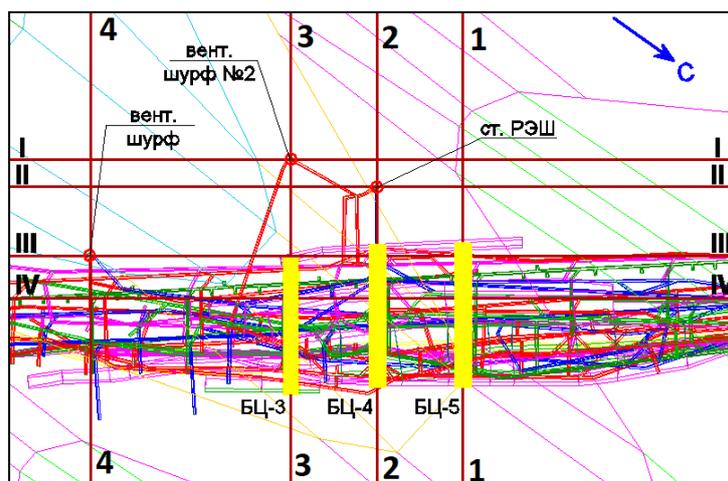


Рис. 4. Анализируемые разрезы геомеханической модели в вертикальной плоскости при оценке влияния развития горных работ и отработки барьерных целиков на состояние земной поверхности, ствола РЭШ и капитальных выработок откаточных горизонтов

Определение условий безопасной подработки зданий, сооружений, коммуникаций, вертикальных стволов, выбор мер их охраны основываются на сравнении расчетных деформаций массива пород и земной поверхности с допустимыми и предельными значениями.

При известных допустимых, предельных и расчетных деформациях земной поверхности подработка зданий и сооружений допускается:

- если ожидаемые деформации меньше допустимых – беспрепятственно;
- если ожидаемые деформации больше по величине предельных – необходимо применение горных мер защиты с целью их уменьшения;

В качестве основного метода исследований принято численное конечно-элементное моделирование (МКЭ) напряженно-деформированного состояния массива горных пород [15-18]. В расчетах принято: ось y – направлена вертикально, ось z – вкост простирания залежи; ось x – по простиранию залежи (т.е. $\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_z = q_z \sigma_y = 0,9\gamma H$, $\sigma_x = q_x \sigma_y = 0,8\gamma H$). Оценка устойчивости массива пород осуществлялась на основе его НДС [19-24].

Дополнительно к математическому моделированию были выполнены аналитические расчеты по прогнозу деформаций подрабатываемых объектов при отработке предохранительного целика ствола РЭШ [25-27].

При этом максимальные оседания земной поверхности определяются как:

$$\eta_{max} = \frac{k_m \times k_a \times L \times D_1 \times m_3}{(2H_0 + D_1)^2} \quad (1)$$

где k_m , k_a – коэффициенты, учитывающие физико-механические свойства, структуру массива пород и угол падения рудной залежи, равные соответственно 0,43 и 1,0; D_1 , L , H_0 – соответственно, размеры выработанного пространства по падению, по простиранию и глубина залегания его верхней границы; m_3 – эффективная мощность выработанного пространства.

Для расчета ожидаемых деформаций толщи и поверхности воспользуемся методикой типовых кривых [28-31], принятой на угольных месторождениях. Расчет сдвижений и деформаций в любой точке мульды сдвижения велся по формулам:

$$\eta = \eta_{max} \times S(z) \quad (2)$$

$$i = \frac{\pm \eta_{max}}{L_i} \times F(z) \quad (3)$$

$$\zeta = 0,5a_0 \times \eta_{max} \times F(z) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{0,5a_0 \times \eta_{max}}{L_i} \times F'(z) \quad (5)$$

где $z = x/L$ – относительная координата рассматриваемой точки в полумульде сдвижения; x – текущая координата точки в полумульде сдвижения, отсчиты-

ваемая от центра мульды (точки максимального оседания); L_i – длина полумульды сдвижения (L_1 – по восстанию рудной залежи, в лежачем боку; L_2 – по падению рудной залежи, в висячем боку); $S(z)$, $F(z)$, $F'(z)$ – типовые функции распределения в полумульде соответственно оседаний, наклонов и горизонтальных смещений, горизонтальных деформаций растяжения-сжатия, задаваемые таблично в зависимости от относительной координаты z ; i – наклоны; ξ – горизонтальное сдвижение; ε – горизонтальная деформация растяжения-сжатия; a_0 – коэффициент, равный 0,3.

Граничные углы принимались равными $\beta_{0l} = 60^\circ$ (в лежачем боку залежей), $\beta_0 = 55^\circ$ (в висячем боку залежей). Тогда длина полумульды в лежачем боку будет равна $L_1 = 420$ м. Расстояние от центра мульды сдвижения до устья ствола РЭШ равно $x = 180$ м. Отсюда, относительная координата устья ствола РЭШ в полумульде сдвижения составит: $z = 180/420 = 0,43$.

Значения типовых функций $S(z)$ и $F(z)$ для заданных значений z приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения функций $S(z)$ и $F(z)$

Объект	z	$S(z)$	$F(z)$	$F'(z)$
Ствол РЭШ	0,43	0,52	0,78	0,86

Горизонтальные смещения ξ устья ствола в сторону выработанного пространства рассчитываются по формуле (4). Длина искривленных участков ствола l_i за счет горизонтального смещения массива в сторону выработанного пространства ориентировочно принимается: $l_i = 428$ м.

Отклонения оси стволов от вертикали i_g определяются по формуле:

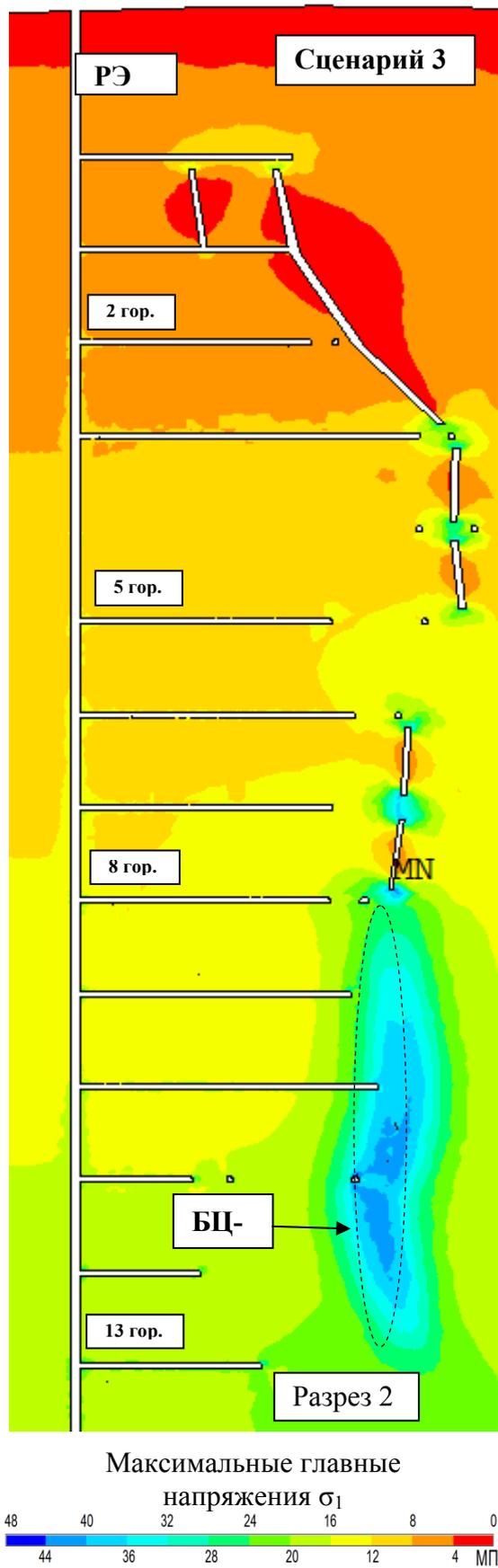
$$i_g = \xi / l_i \quad (6)$$

Допустимые отклонения оси ствола от вертикали i_g составляют 1/5000 от длины искривленного участка, т.е. $i_g = 0,2$ мм/м.

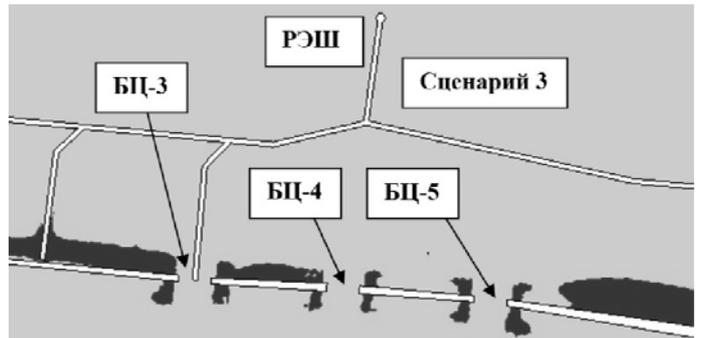
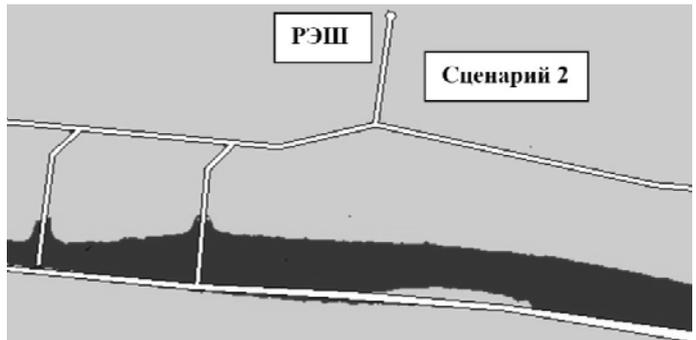
Анализ результатов исследований

Расчетами установлено, что (рис. 5):

- удаленность полевых штреков от залежи обеспечивает их сохранность;
- наличие целиков МЭЦ на 7-12 гор. в условиях 1 сценария препятствует развитию критических деформаций в массиве пород вблизи ствола РЭШ;
- уровень возникаемых горизонтальных деформаций в массиве пород ствола РЭШ не превышают предельных значений;



зоны разрушений пород в плане по гор. № 12



горизонтальные нормальные деформации ϵ_x и ϵ_z в плане по гор. № 12 (Сценарий 3)

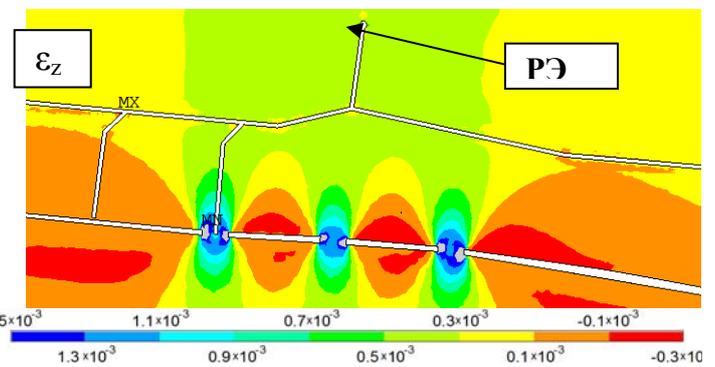
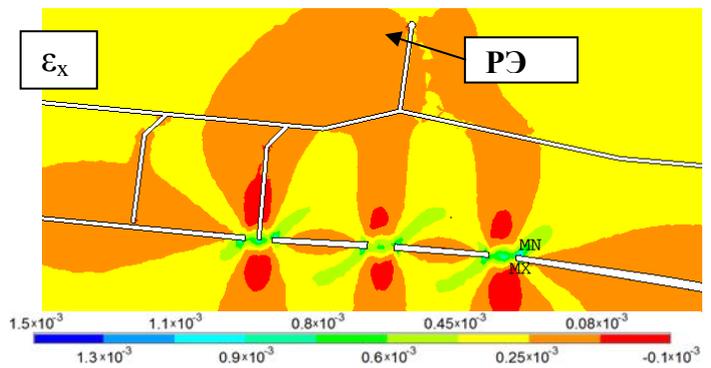


Рис. 5. Фрагменты результатов моделирования НДС массива в пределах предохранительного целика ствола РЭШ

- отработка запасов предохранительного целика по 2-му сценарию (предельный случай) в интервале 9-13 гор. с формированием выработанного пространства пролетом по падению 250 м характеризуется ростом деформаций ϵ_z в массиве пород ствола РЭШ в районе 5-8 и 13 гор ($\epsilon_z = 0,3 \times 10^{-3}$) и снижением ϵ_z на уровне 9-11 гор. от сжимающих к растягивающим ($\epsilon_z < 0,1 \times 10^{-3}$). Поэтому, на первоначальном этапе необходимо в целях безопасности предусмотреть оставления целиков БЦ как временно неактивных, с возможностью последующего (на завершающем этапе) их погашения;

- наличие целиков БЦ (3 сценарий) положительно сказывается на характере распределения и величины горизонтальных нормальных деформаций ϵ_x и ϵ_z в массиве пород ствола РЭШ, и в особенности на нижних горизонтах. Диапазон изменений горизонтальных деформаций ϵ_z в массиве пород свидетельствует об отсутствии предельных их значений в районе ствола РЭШ.

Результаты аналитических расчетов сведены в табл. 2. Выявлено, что ожидаемые величины деформаций подрабатываемых объектов на земной поверхности находятся в допустимых пределах, а именно: горизонтальные деформации земной поверхности у устья ствола РЭШ:

- почти в 1,8 раз ниже допустимых для горных выработок;
- примерно в 12-30 раз меньше, чем допустимые показатели деформаций земной поверхности для бытовых, гражданских и промышленных зданий.

Таблица 2

Расчет сдвижений и деформаций массива пород при отработке запасов руды в границах предохранительного целика ствола РЭШ с погашением выработанного пространства обрушением до 13 гор

Расчетные значения	Значения
Максимальное оседание поверхности, м	0,54
Длина полумульды по восстанию (в лежащем боку) L_1 , м	420
Расстояние от центра мульды сдвижения до устья ст. РЭШ x , м	180
Относительные координаты устья ствола "РЭШ" в полумульде z	0,43
Значения функции $S(z)$:	0,52
Значения функции $F(z)$:	0,78
Значения функции $F'(z)$:	0,86
Ожидаемые оседания устья ствола, м	0,28
Ожидаемые наклоны в районе устья ствола i , мм/м	1,00
Горизонтальные смещения устья ствола, мм	63
Длины искривленных участков ствола l_i , м	428
Отклонения оси ствола от вертикали i_{θ} , мм/м	0,15
Длина полумульды по падению (в висячем боку) L_2 , м	420
Ожидаемые горизонтальные деформации поверхности у устья ствола, мм/м	0,16

Выводы

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов А.Г., Хакимов Х.Х. Обеспечение безопасной эксплуатации шахтных стволов // М.: Недра. – 1988. – 216 с.
2. Фрейдин А. М. Подземная разработка рудных месторождений / А. М. Фрейдин, А. А. Неверов, С. А. Неверов // Учебное пособие. – Под ред. чл.-корр. РАН В.Н. Опарин. – Часть 1, 2. – Новосибирск.: ИГД СО РАН - НГУ. – 2012.
3. А.И. Имангалиев, В.А. Урамов, Ж.Х. Тайжанов. Технология отработки барьерных целиков большой протяженности и значительной ширины под охраняемыми объектами // Горный журнал. – № 11 – 1993.
4. Н. Г. Валиев, и др. Проблемы отработки предохранительных целиков при эксплуатации рудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. - 2018. - № 2.
5. Еременко А.А., Гахова Л.Н., Конуринов А.И., Колтышев В.Н., Приб В.В., Узун Е.Е. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке двух сближенных рудных тел на Шерегешевском месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 1. – С. 67-75.
6. Валиев Н.Г., Беркович В.Х., Пропп В.Д., Кокарев К.В. Проблемы отработки предохранительных целиков при эксплуатации рудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал УГГУ. – № 2. – 2018.
7. Звездкин В.А., Зуев Б.Ю., Истомина Р.С., Шабаров А.Н. Физическое моделирование геомеханических процессов при выемке запасов руд, законсервированных в охранных целиках / Естественные и технические науки. – № 4. – 2013.
8. Еременко В.А., Барнов Н.Г., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Способ разработки крутопадающих маломощных жильных месторождений // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 45-50.
9. Жирнов А.А., Шапошник Ю.Н., Неверов С.А., Никольский А.М. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на Иртышском месторождении и обоснование параметров систем разработки // Горный журнал. – 2018. – № 1. – С. 48-54.
10. И.Т. Слащилин, Х.И. Анлюков, Г.П. Скакун. Опыт применения закладки на шахте Магнетитовая при отработке охранных целиков // Горный журнал № 8 1991.
11. Беркович В. Х. Отработка предохранительных целиков // Изв. вузов. Горный журнал. – 1996. – № 3–4. – С. 93–104.
12. Аглюков Х.И. Уплотнённая закладка при отработке охранных целиков // ФТПРПИ – № 3. – 2004.
13. Potvin Y., Giles G. The development of a new high-energy absorption mesh // Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. – 2008. – pp. 89-94.

14. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Конури́н А.И. К обоснованию выбора и определению параметров геотехнологий добычи руд с учетом вида напряженно-деформированного состояния горных пород // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 180-185.
15. Kelly B. Stress analysis for boreholes on department of defense lands in the western United States: A study in stress heterogeneity // *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* – Stanford University, Stanford, California, February 11-13. – 2013. – P. 139-150.
16. Еременко А.А., Филиппов В.Н., Конури́н А.И., Хмелинин А.П., Барышников Д.В., Христоролюбов Е.А. О параметрах буровзрывных работ при системе разработки подэтажного обрушения на шерэгешевском месторождении // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 126-131.
17. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // *Solid Earth*, 5 (2). – 2014. – pp. 1123-1149.
18. А.М. Фрейдин, А. А. Неверов, С. А. Неверов. Геомеханическая оценка комбинированной системы разработки мощных пологих рудных залежей с закладкой и обрушением / *ФТПРПИ.* – № 5. – 2016. – С. 114-124.
19. Балек А.Е. Управление горным давлением при камерной системе разработки / *ФТПРПИ.* – 1988. – № 1. – С. 25–31.
20. Барнов Н.Г., Еременко В.А., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Обоснование параметров геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья // *Горный журнал.* – 2015. – № 11. – С. 42-47.
21. Шапошник Ю.Н., Неверов А.А., Неверов С.А., Никольский А.М. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // *ФТПРПИ.* – № 3. – 2017. – С. 108-118.
22. A.I. Konurin, S.A. Neverov, A.A. Neverov, M.I. Konurina. GEOMECHANICAL PARAMETRIZATION OF ROCK MASSIF FOR SELECTION AND SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGY OF UNDERGROUND WORKS. // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM2018), Exploration and mining mineral processing, Vol II, Sofia, Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., pp. 451-458. ISBN 978-619-7408-37-9, ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2018/1.3.
23. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Усиков В.И., Потапчук М.И. Геодинамическое состояние массива пород николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // *Горный журнал.* – 2016. – № 12. – С. 13-19.
24. Иофис М.А., Федоров Е.В., Есина Е.Н., Милетенко Н.А. Развитие геомеханики для решения проблем сохранения земных недр // *Горный журнал.* – 2017. – № 11. – С. 18-21.
25. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – М.: Недра, 1989.
26. Louchnikov V.N., Sandy M.P., Eremenko V.A. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs // *Eurasian Mining.* – 2014. – № 1. – P. 54-62.
27. Шапошник Ю.Н. Разработка геомеханической модели массива на Секисовском золоторудном месторождении // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2015. – Т. 2. – № 2. – С. 181-186.
28. A.A. Neverov, A.I. Konurin, S.A. Neverov, N.P. Medvedeva, D.P. Khmelinin. GEOMECHANICAL ANALYSIS OF EXTRACTION OF SUBCARDIAL RESERVES AT THE MAKMAL MINE. // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM2018), Exploration and mining mineral processing, Vol II, Sofia, Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., pp. 427-434. ISBN 978-619-7408-37-9, ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2018/1.3.
29. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – СПб., 1998. – 291 с.

30. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана – Министерство металлургии СССР – Институт горного дела, Свердловск, 1990 г.

31. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – М., Недра, 1981, 288 с.

© С. А. Неверов, Ю. Н. Шапошник, А. М. Никольский, 2019