УДК 622.284

**О.В.ТРУШКО**, *канд. техн. наук, доцент, ov_trushko@yandex.ru*
**А.В.СТРЕЛЕЦКИЙ**, *аспирант, streletski@yandex.ru*
*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**O.V.TRUSHKO**, *PhD in eng. sc., associate professor, ov_trushko@mail.ru*
**A.V.STRELETSKI**, *post-graduate student, streletski@yandex.ru*
*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РУДНОГО МАССИВА ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ ПОД ЗАЩИТНЫМ ПЕРЕКРЫТИЕМ

Представлен анализ натурных шахтных исследований за смещениями глубинных реперов. Разработана пространственная модель и представлены результаты математического моделирования на основе метода конечных элементов нелинейно-деформируемого рудного тела, включающего систему очистных выработок (заходок) 6-го блока гор. –370 м Яковлевского рудника, которые последовательно проходятся и закладываются твердеющей смесью.

***Ключевые слова***: моделирование, рудный массив, выработка, метод конечных элементов, репер, мониторинг, рудная потолочина.

# MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF ORE MASSIVE YAKOVLEVSKY CAUSED BY MINING WORKS UNDER THE PROTECTION CEILING

An analysis of field studies for mining of deep shifts frames is presented in this article. A spatial model is developed, the results of mathematical modeling are presented, they are based on finite element method of nonlinear deformed ore body, which includes the system of wide workings on the 6-th block of –370 m horizon of the Yakovlevsky mine, which consistently pass and laid hardening mixture.

***Key words***: modeling, ore massif, mine working, finite elements method, benchmark, monitoring, ore ceiling.

Яковлевское месторождение богатых железных руд (БЖР) с запасами, превышающими 9,6 млрд т, и содержанием железа в руде до 69 % имеет большое значение в развитии минерально-сырьевой базы Российской Федерации.

Рудная залежь БЖР Яковлевского рудника расположена между метаморфическими породами – железистыми кварцитами и сланцами, которые нагружены толщей осадочных пород. Вследствие сложности строения массива и существенного различия прочностных и деформационных характеристик вмещающих пород и БЖР, природное поле напряжений в рудном массиве не соответствует гравитационному подходу ($\gamma H$). С началом ведения очистных работ при формировании защитного перекрытия наблюдается изменение поля напряжений в рудном и закладочном массиве, закономерности которого не изучены и не имеют аналогов в мировой практике [1].

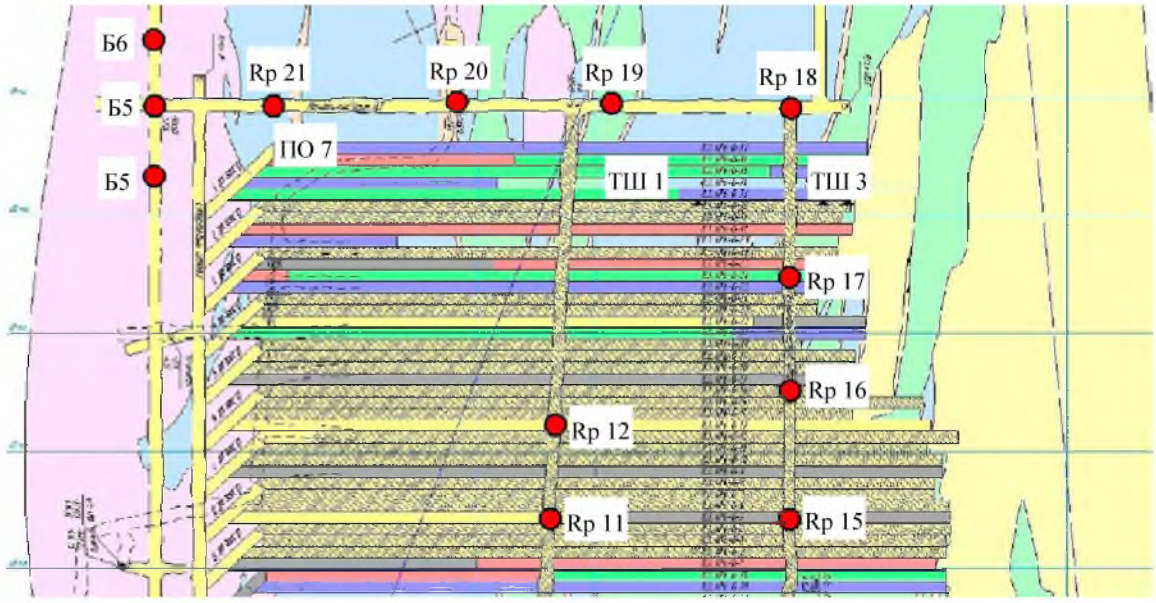



Рис.1. Схема расположения наблюдательных станций глубинных и опорных реперов на гор. –370 м в блоке № 6

Для изучения поля напряжений использовалась комплексная методика исследований напряженно-деформированнного состояния, включающая натурные шахтные исследования напряженно-деформированного состояния массива и математическое моделирование методом конечных элементов.

Важной частью натурных шахтных исследований является геомеханический мониторинг, который проводится с августа 2007 г. по глубинным реперам, заложенным в скважины глубиной 9 м. Скважины системно пробурены в кровле горных выработок, оконтуривающих очистные блоки, расположение станций в блоке № 6 приведено на рис.1 [2].

Внутри и на границах блока № 6 были установлены 9 реперов на глубину 9 м. Инструментальные наблюдения за данной группой реперов ведутся, начиная с декабря 2008 г., максимальные смещения в период наблюдения составили 201 мм.

При проведении анализа полученных натурных данных были построены две диаграммы (рис.2). Первая (рис.2, *а*) иллюстрирует смещения глубинных реперов в техштреке № 3, максимальные смещения фиксируются по реперу № 15, это объясняется большей интенсивностью ведения очистных работ в районе установки данного репера. Вторая (рис.2, *б*) диаграмма иллюстрирует смещения глубинных реперов в панельном орте № 7, в данной группе два из трех реперов на сегодняшний день утеряны.

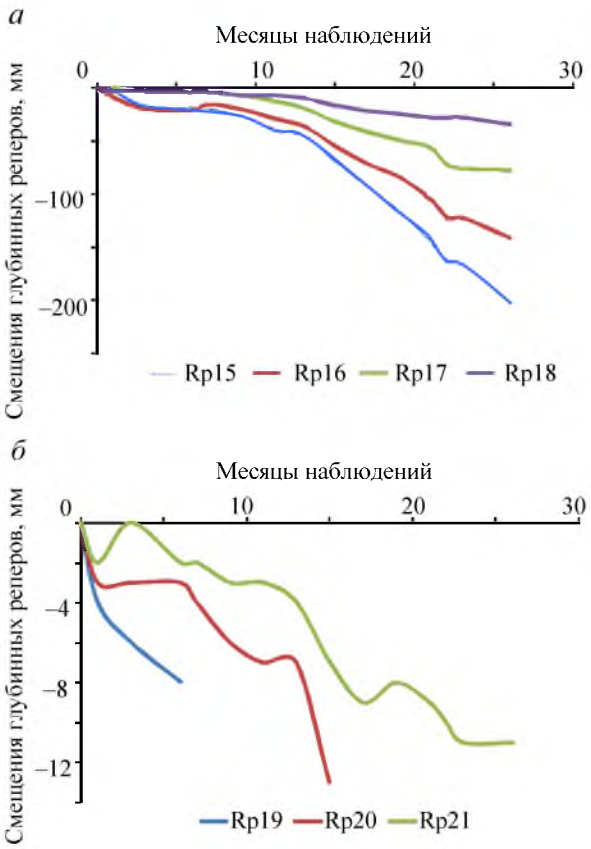



Рис.2. Смещения глубинных реперов № 15-18 в ТШ3 (*а*); № 19-21 в ПО7 (*б*)

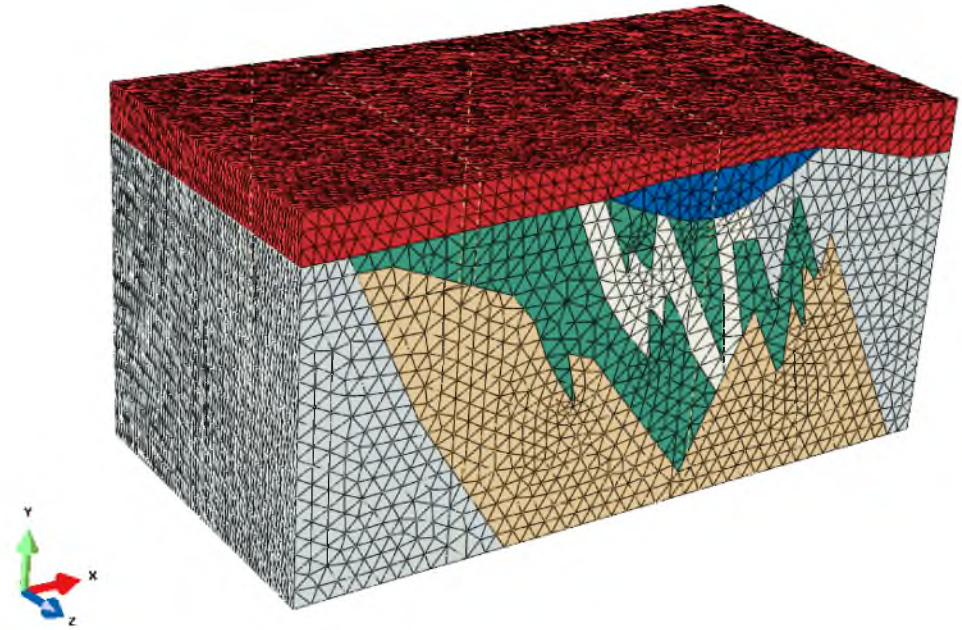


Рис.3. Пространственная модель неоднородного массива



Рис.4. Фрагмент конечно-элементной модели отработки первой очереди очистного блока №6

Исследование напряженно-деформированного состояния массива с учетом влияния очистных работ представляет сложную геомеханическую задачу. Наиболее эффективными методами исследования в таких случаях является физическое или математическое моделирование. В данной работе использовалось математическое моделирование с применением метода конечных элементов.

Пространственная модель представляет собой неоднородный массив, включающий систему очистных выработок (37 заходок) очистного блока № 6, которые последовательно проходятся и закладываются твердеющей смесью. Заходки разделены на выработки первой, второй, третьей и четвертой очереди. Объем и состав моделирования определялся с учетом фактического состояния горных работ на руднике, использовались данные геологической и маркшейдерской службы рудника. Схема геологического разреза модели соответствует профилю III-1600.

Модель представляет собой участок неоднородного массива размером 800×500×400 м, включающий выработки блока № 6 в соответствии с планом горных работ (рис.3, 4).

Размеры модели подбирались, исходя из условия незначительности влияния граничных условий на картину распределения напряжений и деформаций. Для исследования напряженно-деформированного состояния принята нелинейная модель деформирования массива. Для реализации нелинейного характера деформирования массива использована упруго-пластическая модель Кулона – Мора [3].

Граничные условия задавались следующим образом: боковым граням запрещались перемещения по оси *Z*, нижней грани – по оси *Y*, торцевым граням – по оси *X*.

В модели вмещающий выработки массив заменялся нелинейно-деформируемой средой с физико-механическими характеристиками, представленными в таблице.

**Физико-механические свойства пород**

| Наименование пород | Характеристики | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | E, МПа | ν | γ, кН/м$^3$ | C, МПа | φ |
| Известняк | 3640 | 0,29 | 29,0 | 0,78 | 28 |
| Рудная конгломерато-брекчия (переотложенная руда) | 600 | 0,27 | 34,0 | 0,5 | 33 |
| Филлитовидные сланцы | 28900 | 0,22 | 31,1 | 6,3 | 40 |
| Кварцит | 75000 | 0,24 | 34,0 | 15,1 | 42 |
| Руда железно-слюдково-мартитовая | 500 | 0,35 | 33,0 | 0,6 | 28 |
| Руда мартито-гидрогематитовая | 26000 | 0,25 | 32,8 | 1,8 | 35 |
| Закладочный массив | 6000 | 0,25 | 19,0 | 2,1 | 35 |

За критерий соответствия модели реальному состоянию моделируемого участка в натурных условиях принята сходимость вертикальных смещений в толще рудной потолочины в натуре и на модели. Базой для сопоставления являются данные по смещениям глубинных реперов № 15-21, установленных маркшейдерской службой рудника в блоке № 6. Величина смещений, полученная при моделировании, представлена на рис.5.

Результаты натурных шахтных исследований по реперам № 15-18 и результаты математического моделирования показывают достаточную сходимость. Полного соответствия не удается достичь из-за сложности реального строения массива, содержащего прослойки, тектонические нарушения и трещины, которые при моделировании невозможно учесть. Однако достигнутая сходимость полученных результатов позволяет считать разработанную модель адекватной реальной геомеханической обстановке и допускает ее использование для оценки напряженно-деформированного состояния массива при ведении горных работ под защитным перекрытием.

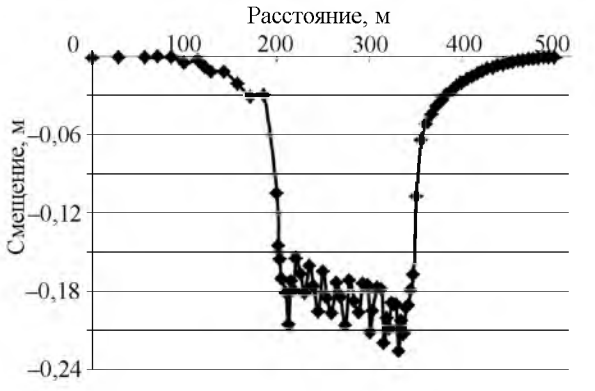



Рис.5. Смещения по линии установки реперов №15-18

## ЛИТЕРАТУРА

1. Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников / В.Л.Трушко, А.Г.Протосеня, Р.Ф.Матвеев, Х.М.Совмен. СПб, 2000.

2. Натурные наблюдения за осадкой рудной потолочины при ведении горных работ на Яковлевском руднике / А.Г.Протосеня, Д.Н.Петров, К.Г.Синякин, Г.А.Мартемьянов // Записки Горного института. СПб, 2011. Т. 190.

3. *Протосеня А.Г.* Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива в зоне влияния очистных работ / А.Г.Протосеня, К.Г.Синякин // Записки Горного института. СПб, 2011. Т.189.

## REFERENCES

1. *Trushko V.L., Protosenya A.G., Matveev R.F., Sovmen Kh.M.* Geomechanics and dynamics of the entry of deep mines. Saint Petersburg, 2000.

2. *Protosenya A.G., Petrov D.N., Sinyakin K.G., Martemyanov G.A.* The field observation for the processes of settling of the ore ceiling caused by mining works at yakovlevsky deposit // Notes of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2011. Vol.190.

3. *Protosenya A.G., Sinyakin K.G.* Modeling of the stress strain state of the ore zone of influence of an array of clean-up operations // Notes of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2011. Vol.189.