

УДК 622.831

## Напряжённое состояние горных пород вблизи очистных выработок на руднике "Карнасурт"

А.В. Ловчиков, С.Н. Савченко

Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация.** Методом численного моделирования исследовано напряжённое состояние комплекса очистных выработок рудника "Карнасурт", обрабатывающего маломощные пологопадающие рудные залежи системами с открытым очистным пространством без обрушения и закладки выработок. Моделирование выполнено при гравитационном и гравитационно-тектоническом напряжённом состоянии массива. Установлено, что устойчивость большепролётных очистных выработок рудника обеспечивается, главным образом, за счёт действия больших тектонических напряжений субгоризонтального направления.

**Abstract.** The stress state of stope workings of the "Karnasurt" mine has been studied using numerical modelling. The "Karnasurt" mine develops thin flat-dipping ore deposits by systems with open stoping and without failures and flushing of workings. Modelling has been carried out under gravitational and gravity-tectonic stress state of the rock mass. It has been established that stability of the large-span stope workings is provided, mainly, due to action of large tectonic stresses of subhorizontal direction.

**Ключевые слова:** пологопадающие залежи, щелеобразные очистные выработки, метод граничных элементов, распределение напряжений, устойчивость кровли выработок, тектонические напряжения

**Key words:** flat-dipping ore deposits, slot-like stope, finite elements method, stress distribution, stability of drift roof, tectonic stresses

### 1. Введение

Рудник "Карнасурт" обрабатывает Ловозерское редкометальное месторождение, расположенное в центре Кольского полуострова. Он является одним из старейших рудников на полуострове, эксплуатируется с 1951 года. Рудник обрабатывает две маломощные (мощностью по 1.0 м) пологопадающие, под углом 10-15°, пластобразные рудные залежи, находящиеся на расстоянии 90-120 м друг от друга по вертикали, системами с открытым очистным пространством и поддержанием покрывающих пород рудными целиками. Ввиду малой выемочной мощности рудных тел, для поддержания производительности приходится обрабатывать большие площади пологопадающих залежей; рудник ежегодно вынимает 100-150 тыс. м<sup>2</sup> залежей без обрушения подработанных покрывающих пород и закладки выработанного пространства. Подземные пустоты накапливаются и к текущему моменту площадь выработанного пространства только по нижележащей рудной залежи составляет более 6 млн м<sup>2</sup> при длине по простиранию залежи 6 км и наибольшей ширине вкрест простирания 1.2 км. Глубина горных работ на руднике составляет от 20-30 м вблизи поверхности, у выходов рудных залежей под наносы на северо-западных склонах Ловозерского массива, до 600-650 м в наиболее глубокой их части.

### 2. Горно-технические условия

Очистные горные выработки рудника имеют щелеобразную форму: при высоте 1 м их ширина составляет 30-90 м, а длина – до 200-250 м; угол наклона выработок к горизонту составляет 10-15°. Выработки отделены друг от друга и капитальных выработок (штолен, штреков) ленточными целиками шириной от 3 м до 15 м (при высоте 1 м). Установлено, что очистные выработки рудника обладают повышенной устойчивостью, поскольку при пролёте между краями целиков до 70-80 м и глубине выработок до 500 м от поверхности, ни одна из пустых отработанных выработок за многие годы не обрушилась. Указанные величины устойчивых пролётов очистных выработок почти на порядок превышают пролёты очистных выработок (6-12 м) на других пологопадающих рудных месторождениях. Основными факторами, способствующими устойчивости очистных выработок на руднике, как установлено (Ловчиков, 1985), являются следующие: высокие деформационно-прочностные свойства массива вмещающих пород (прочность пород при сжатии  $\sigma_{сж} = 140-240$  МПа; прочность при растяжении  $\sigma_{р} = 8.5-12.5$  МПа); действие в массиве высоких тектонических напряжений горизонтального направления; щелеобразная форма большепролётных очистных выработок. Натурными измерениями в массиве рудника установлено, что в нём действует гравитационно-тектоническое поле напряжений (Ловчиков, Козырев, 1988), характеристики которого приведены в таблице.

Таблица. Характеристики естественного напряжённого состояния массива рудника "Карнасурт"

Участок, рудная залежь	Глубина измерений от поверхности, м	Местоположение участка измерений	Величина и направление главных напряжений				Соотношение компонент напряжений $\sigma_3 : \sigma_2 : \sigma_1$
			$\sigma_3$		$\sigma_1$		
			МПа	азимут град., $\pm 180^\circ$	МПа	наклон, град.	
Участок "Карнасурт" нижняя залежь (центральный участок)	400	Гор. +280 м	40	50	11	90	4 : 2 : 1
нижняя залежь (участок "Кедыкверпахк")	310-370	Гор. +370 м, восстающий 28/21 зап.	60	90	10	90	6 : 3 : 1

Ранее проводились оценки напряжённого состояния пород в окрестности выработок рудника методами математического моделирования для верхних горизонтов отработки, когда глубина горных работ не превышала 350-400 м, а протяжённость выработанного пространства нижней залежи вкrest простирания от поверхности составляла не более 600 м (Жуков и др., 1973). Однако в последние годы глубина горных работ возросла до 600-650 м, а протяжённость выработанного пространства вкrest простирания залежи – более 1200 м.

### 3. Постановка задачи и результаты математического моделирования

В настоящей работе ставилась задача оценить напряжённое состояние и степень устойчивости большепролётных очистных выработок рудника на современном этапе отработки. Задача решалась методом граничных элементов в плоской (двухмерной) постановке: моделировался плоский вертикальный разрез рудника в средней части шахтного поля сначала под действием на выработки и целики только собственного веса покрывающих пород с боковым отпором, затем, – совместное действие собственного веса и горизонтальных равномерно распределённых тектонических напряжений  $T_x = -40$  МПа. Схема модели представлена на рис. 1.

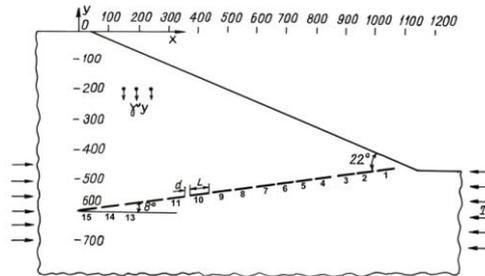


Рис. 1. Расчётная схема и граничные условия для модели поперечного разреза рудника "Карнасурт" (1...15 – порядковый номер очистной панели)

Как видно из рис. 1, исследовалось напряжённое состояние только одной нижележащей залежи, отработанной в наибольшей степени и наиболее заглублённой. Для упрощения все выработки в вертикальном поперечном сечении приняты одинаковой ширины  $L = 65$  м. Выработки разделены одинаковыми по ширине целиками  $d = 10$  м; высота выработок и целиков –  $h = 2$  м. Свойства массива пород приняты следующими: удельный вес пород  $\gamma = 2.7$  т/м<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = 6 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент поперечных деформаций  $\nu = 0.25$ . Расчёт напряжений в исследуемой области выполнен с густотой сетки  $12.5 \times 12.5$  м, вблизи очистных камер по сетке  $5 \times 5$  м, в целиках по сетке  $1 \times 1$  м.

На рис. 2а представлено распределение горизонтальных напряжений в массиве вокруг выработок при действии только гравитационных сил; на рис. 2б – распределение вертикальных напряжений при действии тех же гравитационных сил. Как видно из рис. 2а, горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  в массиве, в основном, сжимающие, однако вблизи очистных камер в их кровле и почве действуют растягивающие напряжения (области между изолиниями  $\sigma_x = 0$  и контуром камер), величина которых достигает 10 МПа. Напряжения  $\sigma_x$  в целиках повсеместно сжимающие, их абсолютное значение по мере увеличения глубины возрастает. Распределение вертикальных напряжений  $\sigma_y$  (рис. 2б) в массиве близко к закономерности:

$$\sigma_y = \gamma y,$$

где  $y$  – расстояние до поверхности по вертикали.

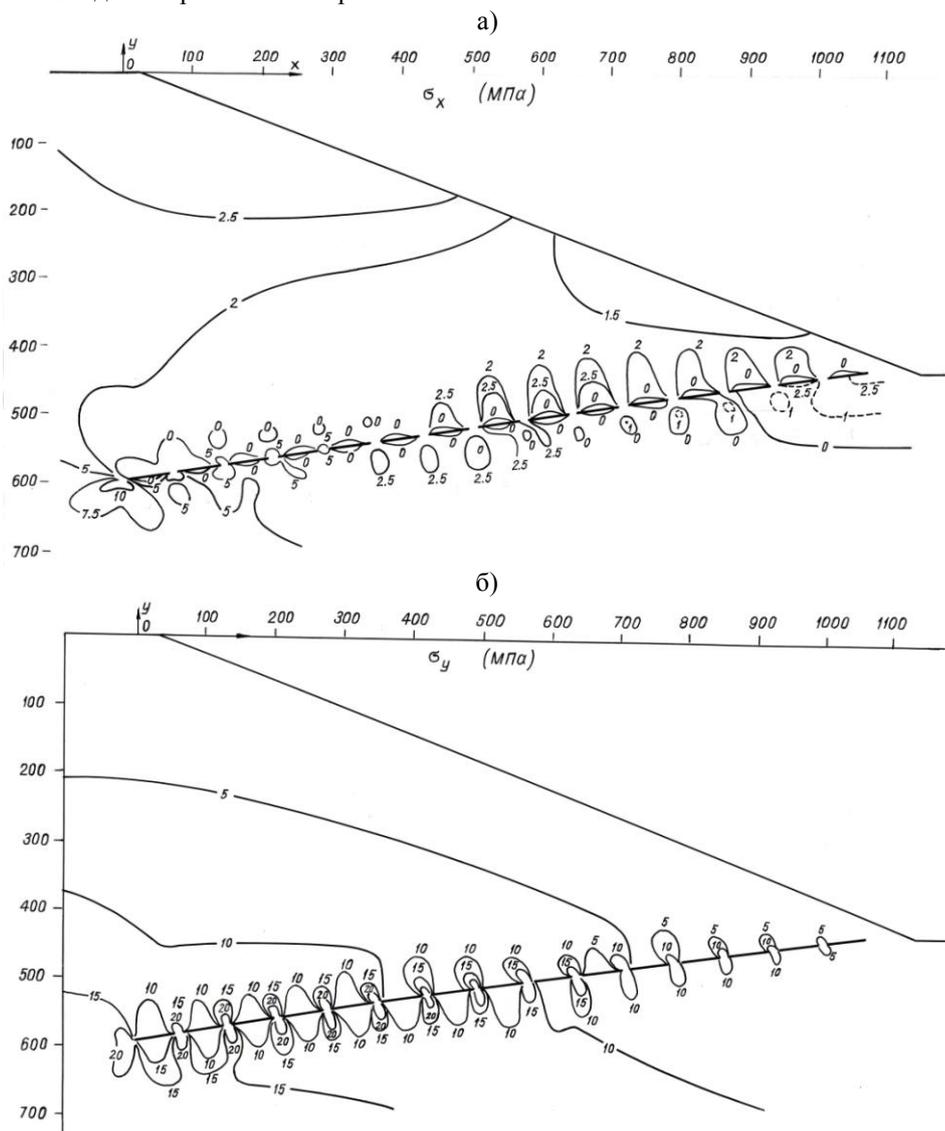


Рис. 2. Распределение горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений в исследованной области при действии гравитационных сил

Вертикальные напряжения в кровле и почве камер  $0 > \sigma_y > -10$  МПа, а над и под целиками  $-10 > \sigma_y > -40$  МПа. Абсолютная величина напряжений  $\sigma_y$  в целиках с возрастанием глубины увеличивается.

Наибольшую опасность для обеспечения устойчивости кровли очистных выработок представляют растягивающие напряжения, поскольку прочность горных пород при растяжении на порядок ниже, чем при сжатии. При этом необходимо учитывать ослабление пород за счёт трещиноватости. При расчётах устойчивости выработок применяют коэффициент структурного ослабления массива  $k_{стр.}$ , значение которого для различных участков шахтного поля рудника "Карнасурт" составляет  $k_{стр.} = 0.15 \div 0.5$  (Методика расчёта..., 1989). С учётом коэффициента структурного ослабления массива, принимая прочность пород кровли на растяжение  $\sigma_p = 10$  МПа, фактическая прочность пород на растяжение составит  $\sigma_p^ф = 2 \div 5$  МПа. Наиболее уязвимой частью очистной выработки по растягивающим напряжениям является контур её кровли. С целью оценки прочности кровли построены графики распределения напряжений  $\sigma_x$  по контуру кровли для всех 15 очистных выработок вертикального разреза (рис. 1). Графики распределения напряжений  $\sigma_x$  на контуре кровли очистных выработок, расположенных вблизи поверхности (1, 2), в средней части (7, 8), и самых заглублённых

(14, 15) представлены на рис. 3. Форма графиков распределения напряжений по контуру кровли выработок, как видно из рис. 3, – седлообразная: вблизи верхнего и нижнего целиков напряжения являются сжимающими, величина которых  $\sigma_x = -(5\div 10)$  МПа, а затем в средней части они переходят в растягивающие, величиной  $\sigma_x = 2\div 10$  МПа. Величина растягивающих напряжений по мере роста глубины возрастает, и для рассматриваемого разреза в центре пролёта выработок она изменяется от 0 в верхней выработке до 10 МПа в нижней. Кроме того, на устойчивость кровли оказывает влияние мощность зоны растягивающих напряжений, то есть расстояние, на которое по глубине от контура вглубь массива развиваются растягивающие напряжения. В рассматриваемом случае за глубину зоны растягивающих напряжений принималось расстояние от контура выработки до максимального удаления от контура изолинии  $\sigma_x = 0$ . Мощность зоны растягивающих напряжений растёт прямопропорционально от 5 м в первой приповерхностной выработке до 20 м в тринадцатой от поверхности выработке и увеличивается до 23-28 м в последних двух выработках. Судя по величине напряжений на контуре кровли выработок, мощности зоны растягивающих напряжений в кровле и прочности пород, с учётом коэффициента структурного ослабления  $\sigma_p = 2\div 5$  МПа, устойчивость кровли, при действии только гравитационных сил, должна была нарушаться практически с самых верхних выработок и до нижних. Поскольку фактически устойчивость выработок в течение многих лет не нарушается, за исключением локальных беспорядочных вывалов и отслоений, обусловленных структурными ослаблениями массива и влиянием буровзрывных работ при образовании выработок, было исследовано влияние на устойчивость горизонтальных тектонических напряжений.

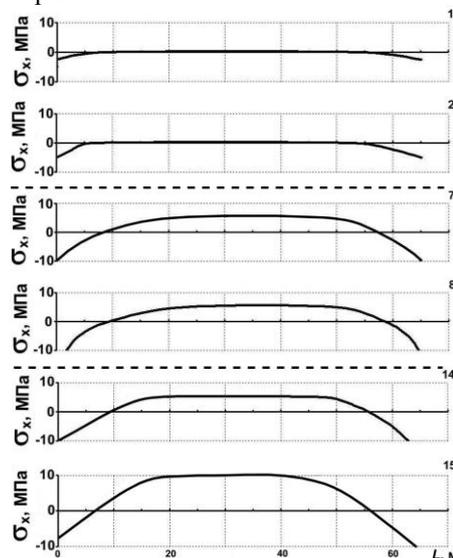


Рис. 3. Графики распределения горизонтальных напряжений по контуру кровли очистных выработок при действии гравитационных сил (1, 2, 7, 8, 14, 15 – порядковый номер выработки от поверхности)

Распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  и вертикальных  $\sigma_y$  при совместном действии гравитационных и горизонтальных тектонических напряжений  $T = -40$  МПа приведены на рис. 4а и 4б.

Как видно из рис. 4а и 4б, в массиве вокруг выработок, при действии горизонтальных тектонических напряжений  $T = -40$  МПа, как горизонтальные, так и вертикальные напряжения повсеместно являются сжимающими, за исключением небольшой локальной области вблизи приповерхностной очистной выработки, где  $\sigma_y$  – растягивающие. Наличие этой области обусловлено спецификой задания граничных условий и для фактического состояния горных выработок не характерно. В остальной области массива вертикальные и горизонтальные напряжения – сжимающие. Наибольшую абсолютную величину  $\sigma_x = 20\div 40$  МПа, как видно из рис. 4а и 4б, имеют горизонтальные сжимающие напряжения. Вблизи соединений последовательности очистных выработок с поверхностью и массивом напряжения  $\sigma_x$  увеличиваются в локальных областях до  $-(80\div 90)$  МПа. Однако эти значения в большей степени обусловлены заданием граничных условий задачи и для фактического распределения напряжений в натуре не характерны. Вертикальные напряжения  $\sigma_y$  имеют величину от 0 до  $-20$  МПа в целиках и немногим отличаются в сторону увеличения от уровня напряжений в целиках при гравитационном напряжённом состоянии массива (рис. 2б).

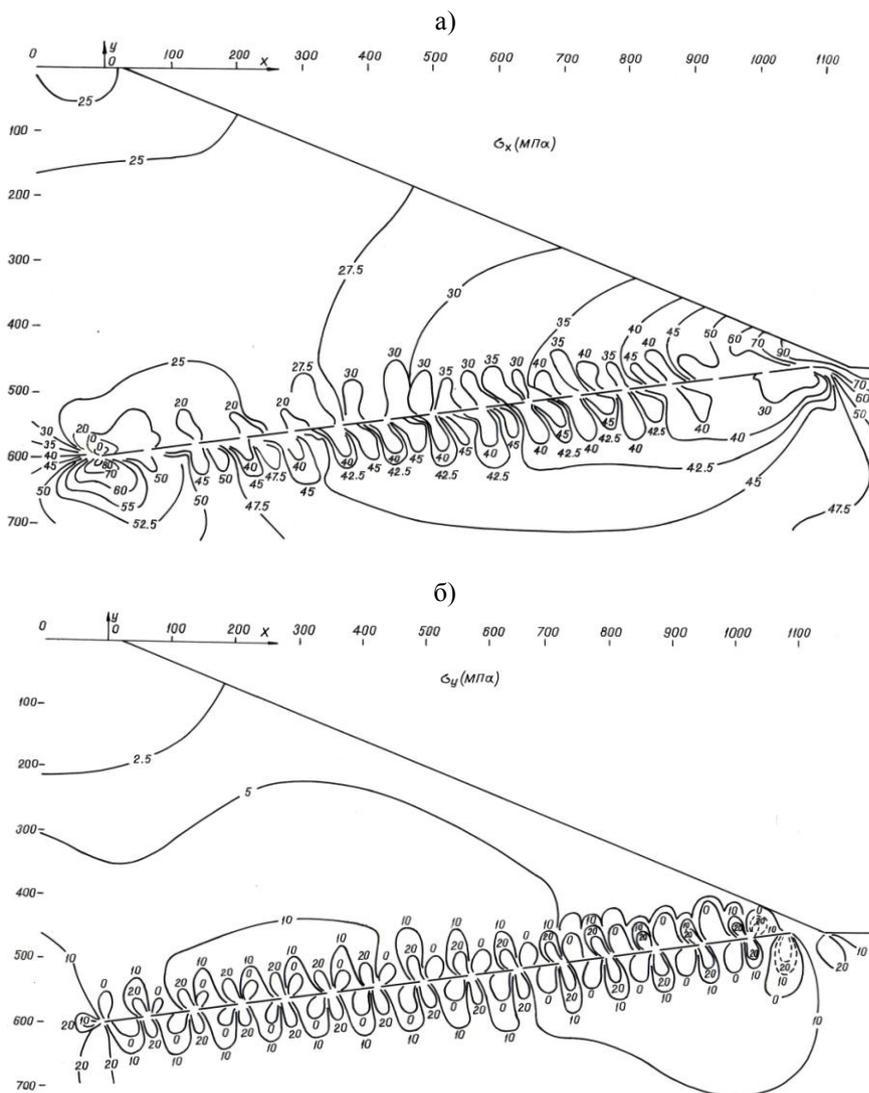


Рис. 4. Распределение горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений в исследованной области при совместном действии гравитационных и тектонических сил

Наиболее ответственной частью выработки, как указывалось, является контур её кровли. На рис. 5 приведены графики распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  по контуру кровли очистных выработок при совместном действии гравитационных и тектонических напряжений в массиве. Как видно из графиков рис. 5, характер напряжений по контуру всех выработок одинаков, величина их изменяется от  $\sigma_x = -20$  МПа в нижнем сопряжении кровли с целиком, до  $-(30-40)$  МПа в средней части пролёта выработок и более резкое возрастание напряжений до уровня  $\sigma_x = -(50 \div 60)$  МПа в части пролёта, прилегающей к верхнему целику. Уровень напряжений в верхнем сопряжении кровли с целиком и под ним – самый высокий и достигает  $\sigma_x = -(60 \div 80)$  МПа. С учётом коэффициента структурного ослабления массива, даже при высоких прочностных свойствах пород ( $\sigma_{сж} = 140$  МПа и выше), этот узел является опасным по динамическим проявлениям горного давления. Следует отметить, что действительно в практике работы рудника "Карнасурт" в этом сопряжении систематически отмечались шелушение, заколообразование пород – первоначальные признаки динамических проявлений горного давления.

Вертикальные напряжения  $\sigma_y$  в целиках при совместном действии гравитационных и тектонических сил, как видно из рис. 4б, имеют более высокий уровень (но несущественно), чем при действии только гравитационных сил. Как видно из сопоставления распределения напряжений вокруг выработок при гравитационном поле напряжений в массиве (рис. 2) и гравитационно-тектоническом (рис. 4), разница в видах напряжённого состояния массива наиболее контрастно проявляется в распределении напряжений по контуру кровли очистных выработок. Таким образом, распределение и

величина напряжений на контуре кровли очистных выработок может служить индикатором естественного напряжённого состояния массива.

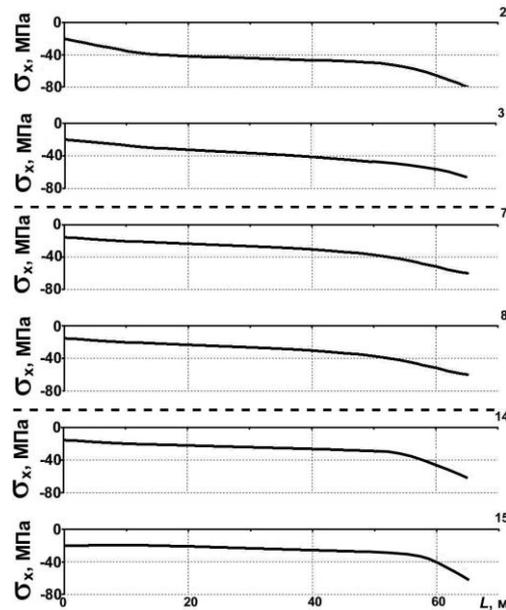


Рис. 5. Распределение горизонтальных напряжений на контуре кровли очистных выработок при совместном действии гравитационных и тектонических сил (2, 3, 7, 8, 14, 15 – порядковый номер выработки от поверхности)

#### 4. Сопоставление с данными натуральных измерений

На руднике "Карнасурт" методом разгрузки были выполнены натурные измерения напряжений в выработке, расположенной в средней части разреза (рис. 1), последовательно, начиная от верхнего сопряжения кровли выработки с целиком, и далее вниз, с интервалом ~1 м, до середины выработки (Ловчиков, 1976). На рис. 6 приведены графики распределения напряжений на контуре кровли выработки, полученные по фактическим натурным измерениям (кривая 3) и по данным выполненного расчёта при действии только гравитационных (кривая 1) и гравитационно-тектонических сил (кривая 2). Как видно из рис. 6, данные натуральных измерений качественно в лучшей мере соответствуют расчётному распределению напряжений при гравитационно-тектоническом силовом поле в массиве. Таким образом, расчётами подтверждается наличие горизонтальных тектонических напряжений в массиве рудника, параметры которых приведены в таблице. Поскольку, как это установлено расчётами, при действии тектонических напряжений в массиве вокруг очистных выработок отсутствуют наиболее опасные растягивающие напряжения, а уровень сжимающих напряжений не превышает  $-(40-45)$  МПа (рис. 4а) (за исключением отдельных локальных областей), то при высоких прочностных свойствах пород кровли их устойчивость обеспечивается. Этим объясняется длительная устойчивость комплексов большепролётных выработок рудника "Карнасурт" при возрастании глубины горных работ и размеров выработанного пространства. Вместе с тем, по результатам расчётов установлено, что над верхним углом сопряжений очистных выработок с целиками развиваются высокие концентрации напряжений сжатия – до  $-(60-80)$  МПа.

В данном узле массива соотношение действующих напряжений в массиве  $\sigma_d$  и прочности пород на сжатие  $\sigma_d > 0.5\sigma_{сж}$ , при котором наблюдаются начальные признаки динамического проявления горного давления (шелушение, заколообразование, стреляние пород) (Козырев и др., 1996). Таким образом, действие тектонических напряжений в массиве приводит к резкому возрастанию неравномерности распределения напряжений вокруг выработок и росту абсолютных величин напряжений в зонах их концентрации. Высокий уровень сжимающих напряжений в указанных выше зонах, в свою очередь, вызывает опасность проявлений горных ударов, что требует контроля и, при необходимости, предупреждения проявлений горных ударов в выработках.

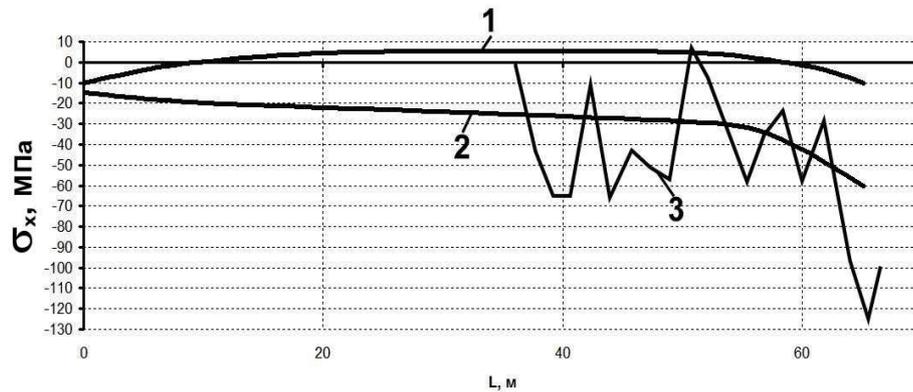


Рис. 6. Графики распределения горизонтальных напряжений по контуру очистной выработки, полученные расчётом при действии гравитационных сил (1), совместном действии гравитационных и тектонических сил (2) и по данным непосредственных измерений (3)

## 5. Выводы

Результаты расчётов показывают, что многолетняя устойчивость кровли большепролётных очистных выработок и подработанных на большой площади пород висячего бока рудной залежи рудника "Карнасурт" обеспечивается за счёт действия горизонтальных тектонических напряжений, существующих в массиве. Вместе с тем, с ростом глубины разработки возрастает величина напряжений на сопряжениях кровли очистных выработок с целиками и в самих целиках. Уровень напряжений на сопряжениях целиков с кровлей на нижних горизонтах становится достаточно высоким ( $\sigma_d \geq 0.5\sigma_{сж}$ ), что приводит к динамическим проявлениям горного давления и вызывает необходимость локального контроля возможных возникновений горных ударов в этих зонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-05-00754а).

## Литература

- Жуков В.В., Чернов Е.В., Довгенко Г.Н.** Напряжённо-деформированное состояние слоистого массива. *Л., Наука*, 132 с., 1973.
- Козырев А.А., Панин В.И., Иванов В.И.** Управление горным давлением в тектонически напряжённых массивах. Ч. 2. *Апатиты, КНЦ РАН*, 162 с., 1996.
- Ловчиков А.В.** Повышенная устойчивость обнажений кровли в очистных выработках в тектонически напряжённых массивах. *Методические разработки по курсу "Физика горных пород"*, М., МГИ, 2 с., 1985.
- Ловчиков А.В.** Проверка прочности кровли протяжённой очистной выработки по данным натурных измерений. *В кн.: Вопросы совершенствования технологии подземных горных работ. Апатиты, КФАН СССР*, с. 26-30, 1976.
- Ловчиков А.В., Козырев А.А.** Напряжённое состояние Ловозерского массива на нижних горизонтах обрабатываемых рудных залежей. *В кн.: Геомеханическое обеспечение разработки месторождений Кольского полуострова. Апатиты, КФАН СССР*, с. 19-25, 1988.
- Методика расчёта и выбора крепи очистных блоков для условий рудника "Карнасурт". *Апатиты, КФАН СССР*, 25 с., 1989.