

УДК 622.831

С.Н. Савченко

Распределение горизонтальных тектонических напряжений в Ковдорском рудном районе

S.N. Savchenko

Distribution of horizontal tectonic stresses in the Kovdor ore region

Аннотация. Методом граничных элементов в двухмерной постановке задачи теории упругости исследовано напряженное состояние массива пород Ковдорской интрузии с учетом ее иерархично-блочного геологического строения. Выделены особенности распределения напряжений в районе современной разработки апатит-магнетитового месторождения (рудник "Железный" ОАО "Ковдорский ГОК"). Установлены зоны предельных растягивающих деформаций в окрестности карьера при заданных граничных условиях и механических свойствах пород.

Abstract. The boundary-element method in 2D setting of task of elasticity theory has been used for research of stress state of rock mass in the Kovdor intrusion taking into consideration its hierarchically-block geological structure. Particularities of stresses distribution have been revealed in the region of apatite-magnetite deposit development by the "Zhelezny" mine, "Kovdorsky GOK" JSC. Zones of maximum tension deformations have been determined in the vicinity of the open-pit under the given boundary conditions and mechanical properties of rocks.

Ключевые слова: Ковдорский рудный район, тектонические напряжения, деформации, сдвиг блоков
Key words: the Kovdor ore region, tectonic stresses, deformations, shear of blocks

1. Введение

Одной из наиболее необходимых информации при организации безопасного ведения горных работ является знание закономерностей распределения механических напряжений в массиве горных пород. В настоящее время многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлен факт действия в горных породах субгоризонтальных тектонических напряжений сжатия. Они в большинстве случаев в 5-10 раз превышают величины напряжений, вызванных весом горных пород. На основе анализа напряженного состояния горных пород на рудных месторождениях Европы (Kozyrev, Savchenko, 2000) показано, что напряжение в районе срединно-атлантического раздвига тектонических плит составляет в среднем величину $T = -50$ МПа (здесь и далее сжимающие напряжения считаются отрицательными). Характер формирования этих напряжений в значительной степени зависит от иерархично-блочного строения тектонических и геологических структур земной коры. Особенности распределения тектонических напряжений на территории Скандинавии и Кольского полуострова с учетом вложенных блочных и геологических образований приведены в работе (Savchenko, Kozyrev, 2003).

Ведущими среди промышленных предприятий Кольского полуострова являются комплексы, осуществляющие эксплуатацию уникальных месторождений апатит-нефелиновых, медно-никелевых, железных и редкометалльных руд. Добыча полезных ископаемых производится с применением различных горнотехнических систем подземным и открытым способами с нарастающим увеличением глубины, что требует особого отношения к вопросу устойчивости пород в элементах используемых разработок.

2. Постановка задачи

Интересными с практической и научной точек зрения представляются закономерности распределения тектонических напряжений в Ковдорской интрузии в целом, в различных местах которой производится добыча полезных ископаемых, и в частности апатит-магнетитового месторождения рудником "Железный" ОАО "Ковдорский ГОК". В работе (Savchenko, Kozyrev, 2003) показано, что массив горных пород Ковдорского рудного района находится почти в однородном тектоническом поле напряжений. При этом в меридиональном направлении действуют напряжения $\sigma_{\min} = 0.8T = -40$ МПа, а в широтном $\sigma_{\max} = 0.85T = -42.5$ МПа. Однако надо понимать, что это средние значения напряжений, формируемые блочно-геологическим строением тектонических структур более высокого порядка. Цель данной работы – выяснить каким образом изменится характер распределения этих напряжений за счет сложного геологического строения данного участка массива, какие величины локальных напряжений необходимо использовать при строительстве и эксплуатации горных сооружений.

В работе (Пожиленко и др., 2002) приведена геологическая карта Ковдорского массива, на основании которой разработана упрощенная расчетная модель (рис. 1), где учтены 9 основных разновидностей

горных пород, буквой "А" обозначено место отработки месторождения карьером "Железный". Физико-механические характеристики пород Ковдорской интрузии, полученные на основе работ (Мельников и др., 1975; Козырев и др., 2012), приведены в табл. 1. На внешней границе модели заданы равномерно распределенные напряжения $\sigma_y^\infty = 0.8T$ и $\sigma_x^\infty = 0.85T$. На границах контактов блоков с различными механическими свойствами представлено непрерывное изменение нормальных напряжений и перемещений:

$$\sigma_n^+ = \sigma_n^-; u_n^+ = u_n^-, \quad (1)$$

где индексами "+" и "-" обозначены значения напряжений и перемещений, отнесенные к разным сторонам контактирующих блоков.

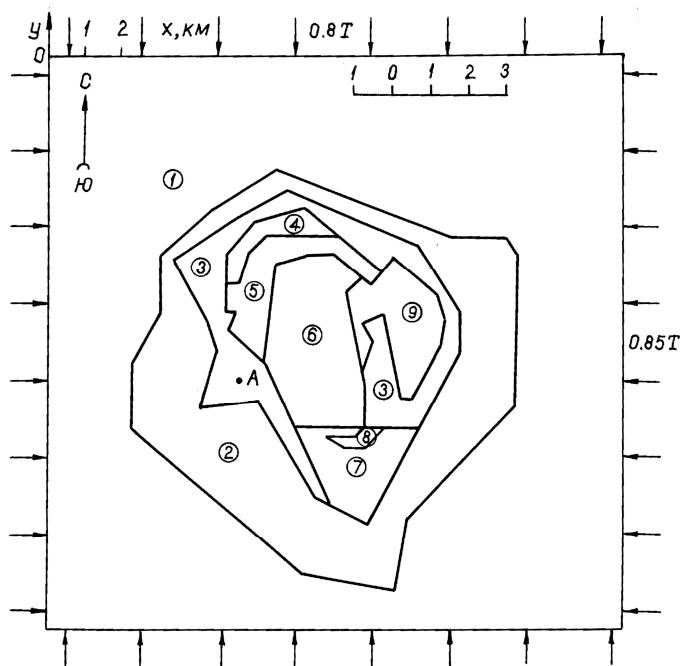


Рис. 1. Расчетная модель для численного моделирования напряженного состояния Ковдорской интрузии. 1-9 – геологические блоки, А – место расположения карьера "Железный"

Таблица 1. Упругие свойства горных пород Ковдорской интрузии

№ блока	Породы	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-4}$ МПа	Коэффициент Пуассона ν	№ блока	Породы	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-4}$ МПа	Коэффициент Пуассона ν
1	Гнейсы	5.2	0.25	6	Оливиниты	10.0	0.23
2	Фениты	7.75	0.23	7	Пегматоидные рудные пироксениты	8.02	0.16
3	Ийолиты	10.5	0.24	8	Ослоденелые метаоливиниты	9.0	0.25
4	Монтчеллитовые породы	8.0	0.25	9	Четвертичные породы	5.03	0.3
5	Пироксениты	7.4	0.11				

3. Решение задачи, обсуждение результатов

На рис. 2 приведено распределение относительных минимальных напряжений σ_x/T , действующих в широтном направлении. Все эти напряжения сжимающие, их величины во всей интрузии изменяются в пределах от $0.2T$ до $1.8T$. Наибольшая концентрация σ_x наблюдается в правой части блока 3 (наиболее крепкие породы), под южной частью блока 9, представленного слабыми породами четвертичных отложений. Наименьшие величины $\sigma_x \approx 0.2T$ приурочены к блоку 9. В остальной части интрузии σ_x распределены неравномерно и их величины находятся в интервале от $0.8T$ до T . Средняя величина $\sigma_x = 0.85T$ относится к району отработки месторождения карьером "Железный".

Напряжения σ_y (рис. 3), величины которых во всей интрузии изменяются от $0.16T$ до $1.5T$, также распределены неравномерно. Наибольшие их концентрации приурочены к контактам более крепких пород с четвертичными породами с запада и востока. В районе отработки месторождения $\sigma_y = 1.05T$.

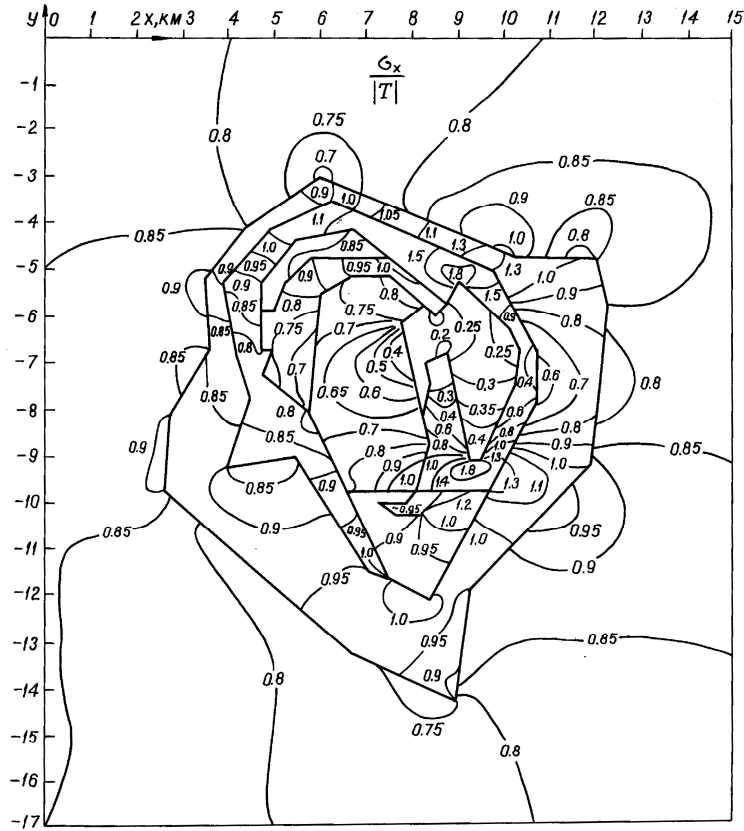


Рис. 2. Распределение относительных минимальных напряжений σ_x/T в районе Ковдорской интрузии

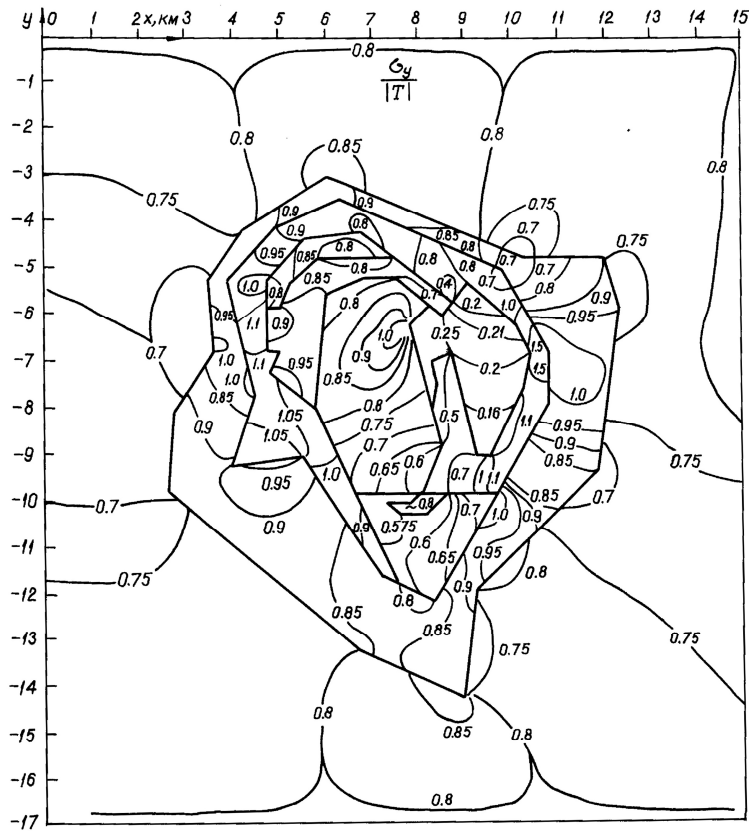


Рис. 3. Распределение относительных максимальных напряжений σ_y/T в районе Ковдорской интрузии

Исследованию напряженного состояния пород в окрестности карьера "Железный" численными методами в трехмерной постановке задачи методом конечных элементов в последнее время посвящено много работ (Аветисян, 2013; Козырев и др., 2012; Козырев, 2012).

В работе (Аветисян, 2013) исследуется распределение напряжений при действии на границе переменных по глубине тектонических сил, когда максимальные σ_{max} направлены вдоль длинной и короткой осей карьера. При этом предполагается, что в другом (ортогональном) направлении на границе модели действуют $\sigma_{min} = 0.5\sigma_{max}$. В качестве пород, слагающих массив, учтены три вида: вмещающие породы $E_n = 1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_n = 0.2$, породы рудного тела $E_m = 0.5 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0.35$, разломные структуры I-го порядка и ослабленная зона в юго-восточном борту карьера $E_0 = 0.1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_0 = 0.4$. Рассмотрены области вблизи карьера, где действуют деформации растяжения.

С учетом изложенных выше особенностей распределения напряжений в массиве Ковдорской интрузии исследуем их закономерности вблизи карьера на глубине 200 м от дневной поверхности. В расчетной модели учтем 8 разновидностей горных пород, выделенных в структурно-геологических секторах, в которых нет четкой разницы между слагающими их породами, но по механическим свойствам их все-таки разделить можно, исходя из их пропорционального соотношения в каждом секторе. В табл. 2 приведены их упругие характеристики.

Таблица 2. Упругие свойства пород в структурно-геологических секторах в районе карьера "Железный"

№ сектора	Породы	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-4}$ МПа	Коэффициент Пуассона ν	Предел прочности		Предел растягивающих деформаций $\epsilon_p \cdot 10^{-4}$
				при сжатии $\sigma_{сж}$ МПа	при растяжении σ_p МПа	
1	пироксенит 70 %, карбонатит 30 %	6.9	0.1	-63	8	0.12
2	пироксенит 100 %	7.4	0.11	-88	10	0.13
3	ийолит 70 %, пироксенит 30 %	8.9	0.18	-142	10	0.11
4	фенит 70 %, ийолит 30 %	8.25	0.224	-150	11	0.13
5	фенит 70 %, пироксенит 30 %	7.65	0.194	-127	11	0.14
6	фенит 70 %, карбонатит 30 %	7.1	0.185	-117	9	0.13
7	ийолит 70 %, карбонатит 30 %	8.26	0.17	-132	8	0.1
8	фенит 70 %, ийолит 30 %	8.25	0.224	-150	11	0.13

На рис. 4 приведено распределение относительных минимальных напряжений σ_{min}/T в соответствующих секторах 1-8 при действии на границе $\sigma_x^\infty = 0.85T$ и $\sigma_y^\infty = 1.05T$. Характерной особенностью этого распределения является то, что напряжения σ_{min} , являясь нулевыми на границе карьера (карьер свободен от внешних усилий), по величине возрастают до значений $\sigma_{min} = \sigma_x^\infty$, оставаясь сжимающими. Очевидно, что характер их изменения в каждом секторе различный и зависит не только от механических свойств пород в рассматриваемом секторе, но и от того, каковы свойства пород в соседних секторах.

На рис. 5 показано распределение относительных максимальных напряжений σ_{max}/T . Здесь очевидна следующая закономерность: вблизи контура карьера σ_{max} имеют максимальное по величине значение $1.3T \leq \sigma_{max} \leq 2T$, которое уменьшается по мере удаления от контура в массив до $\sigma_{max} = \sigma_y^\infty$.

Исходя из этих закономерностей распределения минимальных и максимальных напряжений, становится очевидной теоретическая необходимость возникновения растягивающих деформаций ϵ_1 вблизи карьера до тех пор, пока $\sigma_{min} < -\nu\sigma_{max}$.

На рис. 6 показаны зоны, где действуют деформации растяжения в исследуемых секторах при заданных граничных условиях и механических свойствах пород. Это достаточно протяженные зоны, величина которых достигает размеров $0.2L$ и более, где L – наибольший диаметр карьера. Растягивающие деформации для устойчивости горных пород весьма опасны, так как для не нарушенных трещинами пород предел прочности на растяжение весьма мал $\approx 0.1\sigma_{сж}$. Поэтому здесь важную роль играет величина предельных деформаций удлинения, которую можно оценить зависимостью:

$$\epsilon_p = \sigma_p/E, \tag{2}$$

где σ_p – предел прочности пород при растяжении.

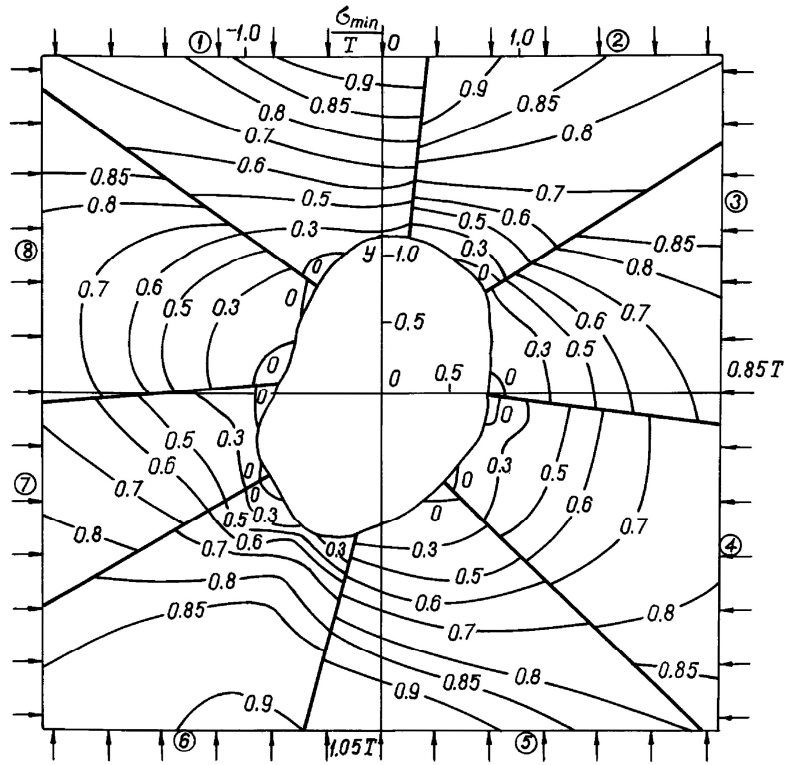


Рис. 4. Распределение относительных минимальных напряжений σ_{\min}/T вблизи карьера "Железный", 1-8 – структурно-геологические сектора

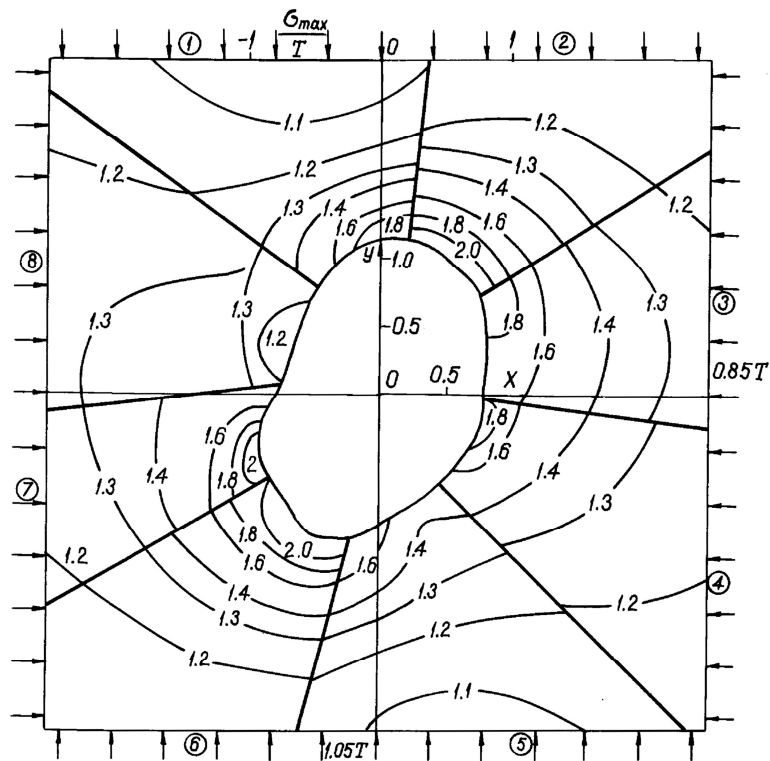


Рис. 5. Распределение относительных максимальных напряжений σ_{\max}/T вблизи карьера "Железный"

На рис. 6 пунктирной линией показана область предельных деформаций растяжения. Эта область подобна области предельных значений удельной энергии деформирования при растяжении:

$$w = \varepsilon_p \sigma_p / 2. \quad (3)$$

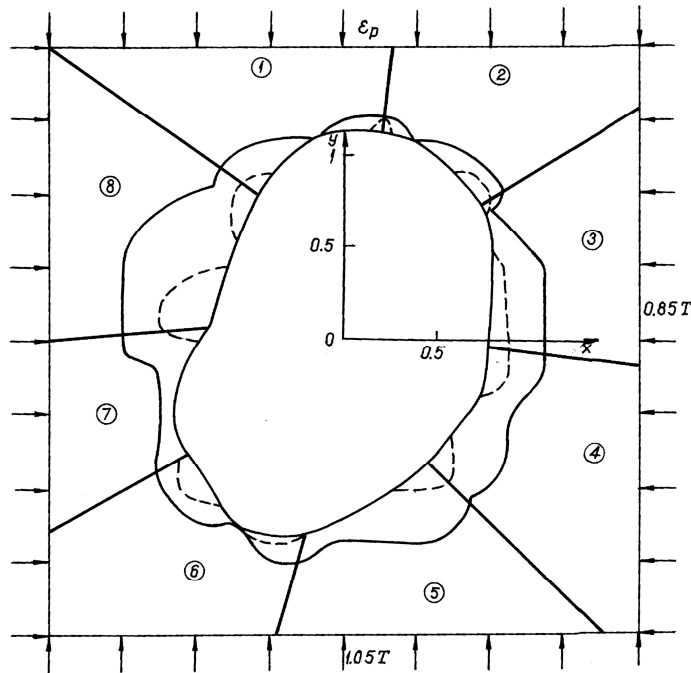


Рис. 6. Зоны действия деформаций растяжения вблизи карьера "Железный",
 — граница действия растягивающих деформаций,
 - - - - граница действия предельных растягивающих деформаций

Из рис. 6 видно, что величина предельных деформаций растяжения формируется вблизи разломов, разделяющих структурные блоки. Это связано с тем, что по границам раздела структурно-геологических сегментов происходит их сдвиг друг относительно друга наряду с возникновением растягивающих деформаций параллельно границе карьера.

Для выяснения причин сдвига блоков необходимо определить величину предельных напряжений, при которых происходит сдвиг, т.е. необходимо знать $|\tau|_{np}$. В соответствии с теориями прочности для хрупких материалов (Беляев, 1949) на практике используется зависимость

$$|\tau|_{np} = (0.8-1.0) |\tau|_{np}. \quad (4)$$

Очевидно, что сдвиг по какой-либо поверхности ослабления может произойти тогда, когда минимальные величины касательных напряжений будут равны $|\tau|_{np}$, т.е. условие (4) будет выполняться в любой точке этой поверхности. В нашем случае вблизи границ контактов структурно-геологических секторов действуют главные напряжения: $\sigma_1 = (0-0.85)T$ и $\sigma_2 = (2.0-1.05)T$. Следовательно, наименьшим касательным напряжением на границе раздела секторов будет

$$|\tau|_{np} = |(0.85-1.05)/2 T| = 0.1|T| = 5 \text{ МПа}. \quad (5)$$

Учитывая обстоятельство, что для наших горных пород $|\sigma_p| \approx (10-15) \text{ МПа}$, можем сделать вывод, что условие (4) выполняется.

4. Заключение

Таким образом, закономерности распределения тектонических напряжений в Ковдорской интрузии следующие:

1. Величины относительных минимальных и максимальных тектонических напряжений и характер их распределения в Ковдорской интрузии существенным образом зависят от наличия области ослабленных пород четвертичного отложения, располагаемой на северо-востоке массива. Окружающие ее участки крепких пород воспринимают на себя большую часть нагрузок аналогично тому, как располагаются зоны повышенных напряжений вблизи горных выработок. В окрестности отработки апатит-магнетитового месторождения карьером "Железный" в направлении восток – запад действуют напряжения $\sigma_x^\infty = 0.85T = -42.5 \text{ МПа}$, а в направлении север – юг – $\sigma_y^\infty = 1.05T = -52.5 \text{ МПа}$.

2. Вблизи карьера за счет образования техногенной, свободной от внешних усилий, поверхности и существующих природных структурно-геологических секторов происходит дальнейшее перераспределение тектонических напряжений, минимальная величина которых вблизи границы карьера $\sigma_{\min} = 0$, а максимальная $\sigma_{\max} = (1.8-2.0T) = -(90-100)$ МПа.

3. Неравномерное распределение тектонических напряжений вблизи карьерной выемки приводит к возникновению зон растягивающих деформаций, предельные величины которых приурочены к зонам контактов структурно-геологических секторов вблизи границы карьера. Зоны предельных деформаций растяжения подобны зонам концентрации предельных величин упругой энергии деформирования при растяжении.

4. Вблизи границы карьера, в зоне контактов структурно-геологических секторов, при действии в массиве пород предельных касательных напряжений происходит смещение секторов друг относительно друга, что увеличивает размеры зон неблагоприятных деформаций.

Литература

- Kozyrev A.A., Savchenko S.N.** The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modeling. Geocology and Computers. Rotterdam, Brookfield, 2000. P. 431-435.
- Savchenko S.N., Kozyrev A.A.** An investigation of the state of stress of rock composing the Fennoscandia and Kola Peninsula block structures using the numerical modeling data. Mining in the Arctic. Ed. J.E. Udd, G. Bekkers. Montreal, Quebec, 2003. P. 303-312.
- Аветисян И.М.** Исследование напряженно-деформированного состояния пород в бортах глубокого карьера при действии тектонических напряжений (на примере карьера "Ковдорского ГОКа"). Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Апатиты, 2013. 20 с.
- Беляев Н.М.** Сопrotивление материалов. Л., ГИТТЛ, 1949. 772 с.
- Козырев А.А.** Геомеханика глубоких карьеров, средства и методы контроля устойчивости прибортового массива. Глубокие карьеры. СПб., Реноме, 2012. С. 52-67.
- Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В.** Геомеханическое обоснование устойчивости бортов глубоких карьеров в массивах иерархично-блочной структуры. Глубокие карьеры. СПб., Реноме, 2012. С. 307-316.
- Мельников Н.В., Ржевский В.В., Протодьяконов М.М.** Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М., Недра, 1975. 279 с.
- Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В.** Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты, КНЦ РАН, 2002. 359 с.

References

- Avetisyan I.M.** Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porod v bortah glubokogo karera pri deystvii tektonicheskikh napryazheniy (na primere karera "Kovdorskogo GOKa") [Study of stress-strain state of rocks in deep open-pit walls under tectonic stresses (case study of the "Kovdorskiy GOK" open-pit)]. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Apatity, 2013. 20 p.
- Belyaev N.M.** Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. L., GITTL, 1949. 772 p.
- Kozyrev A.A.** Geomehanika glubokih karerov, sredstva i metody kontrolya ustoychivosti pribortovogo massiva [Rock mechanics of deep open-pits, tools and methods to control stability of near-wall rock mass]. Glubokie karery. SPb., Renome, 2012. P. 52-67.
- Kozyrev A.A., Kasparyan E.V., Rybin V.V.** Geomehanicheskoe obosnovanie ustoychivosti bortov glubokih karerov v massivah ierarhichno-blochnoy struktury [Geomechanical substantiation of deep open-pit walls in hierarchically-block rock massifs]. Glubokie karery. SPb., Renome, 2012. P. 307-316.
- Melnikov N.V., Rzhavskiy V.V., Protodyakonov M.M.** Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornyh porod [Guide (cadastre) of rocks' physical properties]. M., Nedra, 1975. 279 p.
- Pozhilenko V.I., Gavrilenko B.V., Zhiron D.V., Zhabin S.V.** Geologiya rudnyh rayonov Murmanskoy oblasti [Geology of mineral areas of the Murmansk Region]. Apatity, KNTs RAN, 2002. 359 p.

Информация об авторе

Савченко Степан Николаевич – Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, e-mail: savc@goi.kolasc.net.ru

Savchenko S.N. – Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Leading Researcher, e-mail: savc@goi.kolasc.net.ru