УДК 550.34

С.Н.САВЧЕНКО, *д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, root@goi.kolasc.net.ru*
Э.В.КАСПАРЬЯН, *д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, root@goi.kolasc.net.ru*
Ю.Г.СМАГИНА, *вед. технолог, root@goi.kolasc.net.ru*
Горный институт Кольского научного центра РАН, Мурманская обл., г.Апатиты

S.N.SAVCHENKO, *Dr. in eng. sc., leading research assistant, root@goi.kolasc.net.ru*
E.V.KASPARYAN, *Dr. in eng. sc., leading research assistant, root@goi.kolasc.net.ru*
Y.G.SMAGINA, *leading technologist, root@goi.kolasc.net.ru*
Mining Institute of the Kola Research Center of RAS, Murmansk region, Apatity

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ

Предложена методика обработки результатов светодальномерных и нивелирных измерений на подземных геодинамических полигонах, заключающаяся в вычислении тензоров дополнительных напряжений и деформаций, компонент вращения и удельной энергии деформирования. В качестве примера применения предлагаемой методики рассмотрено изменение во времени перемещений, деформаций и удельной энергии деформирования на одном из геодинамических полигонов Кольского п-ова.

Ключевые слова: светодальномерные и нивелирные измерения, геодинамические полигоны, тензоры дополнительных напряжений и деформаций, компоненты вращения блоков, графики вертикальных и горизонтальных перемещений пунктов наблюдений, рост дополнительной энергии деформирования блоков затухания солнечной активности.

INVESTIGATION OF PRESENT-DAY STRESS-STRAIN STATE OF ROCK MASS BY THE RESULTS OF OBSERVATIONS AT GEODYNAMIC POLYGONS

The methods are suggested for treatment of the results of optical distance and levelling measurements at the underground geodynamic polygons involving in their calculation the tensors of additional stresses and deformations, component of rotation and specific energy of deformability. As an example, consideration is given to changes in time of movements, deformations and specific energy of deformability at one of geodynamic polygons of the Kola peninsular.

Key words: optical distance and levelling measurements, geodynamic polygons, tensors of additional stresses and deformations, components of blocks rotation, graphs of vertical and horizontal movements of observation stations, growth of additional energy of deformation of blocks of solar activity attenuation.

Ведение крупномасштабных горных работ на горнорудных предприятиях вследствие роста объемов добычи полезных ископаемых обусловливает существенные трудности при управлении горным давлением. Решение этой задачи значительно осложняют естественная тектоническая напряженность горных массивов и их иерархично-блочное строение. В полной мере это проявляется в Хибинском массиве, где более 80 лет отрабатываются апатит-нефелиновые месторождения. При этом горные работы подземных рудников и карьеров располагаются в настоящее время достаточно близко друг от друга и образуют

почти непрерывное выработанное пространство протяженностью более 20 км.

Оба фактора в совокупности с результатами инженерной деятельности приводят иногда к катастрофическим динамическим явлениям – горным ударам и техногенным землетрясениям [1, 2, 4]. Поэтому на наиболее проблемных и ответственных участках природно-технической системы необходимо проводить постоянный мониторинг геологической среды.

На горно-рудных предприятиях Кольского п-ова оборудовано несколько геодинамических (наземных и подземных) полигонов, на которых периодически производятся GPS, светодальномерные, нивелирные и тахеометрические измерения.

Традиционная обработка результатов геодезических измерений заключается в вычислении перемещений пунктов наблюдения (реперных точек) и анализе изменения их положения в пространстве и времени. Однако, применяя методы теории упругости и тензорного исчисления, можно с большей детальностью анализировать результаты натурных измерений, выделяя из общих перемещений вращения отдельных блоков, параметры их напряженно-деформированного состояния, энергонасыщенность.

Применяемая нами методика заключается в следующем

1. Предполагается, что реперы находятся в одной вертикальной плоскости. Начало системы координат *xOz* совмещается с условно «неподвижным» репером (рис. 1).

2. В каждый момент времени t_0, t_1, t_2, …, t_j вычисляется приращение высотных отметок Δz_{ij} *i*-го репера относительно «неподвижного» в начальный момент времени t_0:

$$\Delta z_{ij} = z_{ij} - z_{i0},$$

где *i* – это номер репера, *j* – номер цикла измерений.

3. По расстояниям между исходным и *i*-м пунктами находятся горизонтальные координаты реперов:

$$x_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 - (z_{ij} + y)^2} + S,$$

где R_{ij} – наклонное расстояние между *i*-м и исходным репером во время t_j; *y* и *S* –

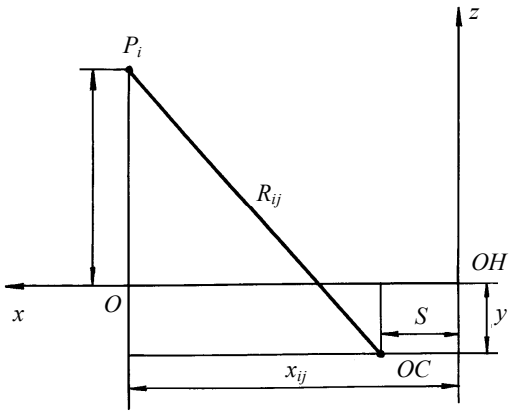


Рис.1. Схема расположения пунктов наблюдения

разность высот и горизонтальное расстояние установки светодальномера и нивелира на исходном пункте наблюдения.

4. Определяются величины горизонтальных и вертикальных перемещений реперов в момент времени t_j:

$$\left.\begin{aligned} u_{ij} &= x_{ij} - x_{i0} \\ v_{ij} &= z_{ij} - z_{i0} \end{aligned}\right\}.$$

Зная координаты пунктов наблюдения, можно в любой момент времени найти перемещения *i*-го репера относительно *k*-го:

$$\left.\begin{aligned} u_{ij}^k &= x_{ij} - x_{k0} \\ v_{ij}^k &= z_{ij} - z_{k0} \end{aligned}\right\}.$$

5. Для определения компонент дополнительных деформаций массива горных пород между соседними реперами в каждый момент времени необходимо решить две системы уравнений относительно четырех неизвестных $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$:

$$\left.\begin{aligned} u_{ij} &= x_{i0}a_{11} + z_{i0}a_{12} \\ u_{kj} &= x_{k0}a_{11} + z_{k0}a_{12} \end{aligned}\right\};$$

$$\left.\begin{aligned} v_{ij} &= x_{i0}a_{21} + z_{i0}a_{22} \\ v_{kj} &= x_{k0}a_{21} + z_{k0}a_{22} \end{aligned}\right\}.$$

6. По найденным таким способом величинам $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ определяются компоненты тензоров деформаций и жесткого вращения блоков, как целого:

$$E = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dfrac{a_{12}+a_{21}}{2} \\ \dfrac{a_{12}+a_{21}}{2} & a_{22} \end{pmatrix};$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \dfrac{a_{12}-a_{21}}{2} \\ \dfrac{a_{21}-a_{12}}{2} & 0 \end{pmatrix}.$$

7. Главные деформации при этом находятся из уравнения

$$\rho^2 - (\varepsilon_x + \varepsilon_y)\rho + (\varepsilon_x\varepsilon_y - \varepsilon_{xy}^2) = 0.$$

Корни этого квадратичного уравнения ρ_1, ρ_2 соответствуют главным деформациям:

$$\rho_{1,2} = \frac{(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\varepsilon_{xy}^2}}{2},$$

при этом алгебраическая величина ε_1 должна быть больше алгебраической величины ε_2.

8. Ориентация главной деформации ε_1 относительно оси *Ox* определяется по формуле

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}.$$

9. Предполагая массив деформируемым упруго и зная величину модуля Юнга (*E*) и коэффициента Пуассона (ν), на основании закона Гука можно найти компоненты тензоров дополнительных напряжений

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + 2\mu\varepsilon_x \\ \sigma_y &= \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + 2\mu\varepsilon_y \\ \tau_{xy} &= \mu\varepsilon_{xy} \end{aligned}\right\},$$

где $$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)},$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Главные напряжения при этом имеют вид

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2);$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1).$$

10. Весьма важной характеристикой состояния горных пород является удельная энергия деформирования, которая в случае плоской деформации определяется по формуле

$$W = \frac{\lambda + 2\mu}{2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) + \lambda\varepsilon_1\varepsilon_2.$$

В качестве примера использования разработанной методики рассмотрим результаты светодальномерных и нивелирных измерений, выполненных на геодинамическом полигоне Кировского рудника ОАО «Апатит», оборудованном на гор.+252 м вблизи Саамского разлома. На этом полигоне выполнено 18 циклов измерений в период с 05.12.2002 по 01.10.2008 г.

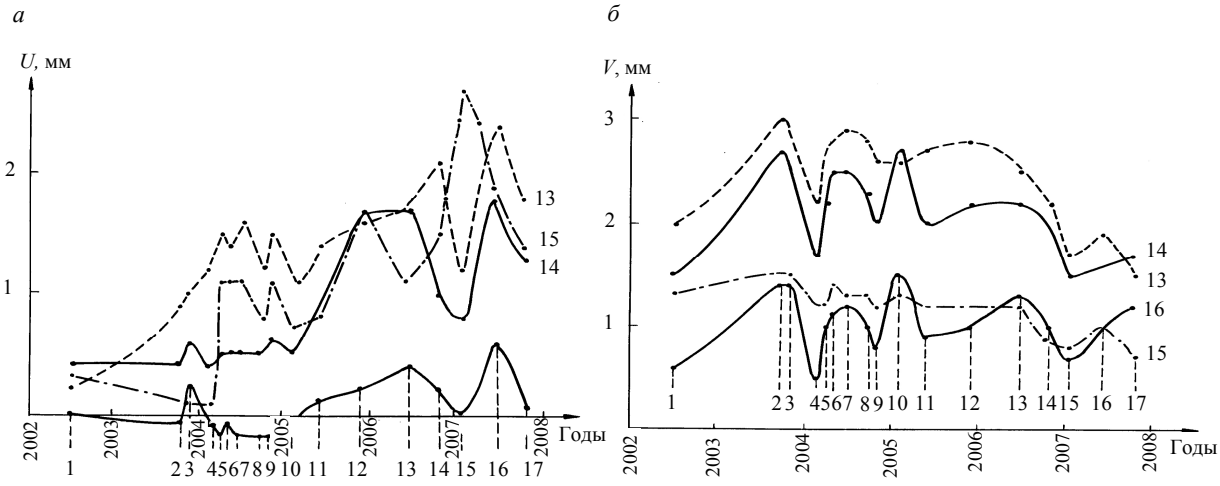


Рис.2. Графики изменения горизонтальных (*а*) и вертикальных (*б*) перемещений пунктов наблюдения на гор. + 252 м Кировского рудника

В соответствии с приведенной методикой обработки результатов измерений разработана программа и получены компоненты перемещений и соответствующих тензоров (рис.2).

Репер Р16 в начальные циклы измерений имеет отрицательные горизонтальные перемещения, т.е. он приближался к «неподвижному» реперу Р17. Эти перемещения составляют доли миллиметров. В дальнейшем горизонтальные перемещения всех реперов положительны – они удаляются от репера Р17. Вертикальные перемещения (рис.2, *б*) всех реперов во все циклы измерений положительны – они испытывают поднятие. По всей видимости это происходит вследствие действия в массиве сложного напряженного состояния, а также в результате перераспределения напряжений при ведении горных работ. Аналогичный результат получен в работе [3]. И горизонтальные, и вертикальные перемещения всех реперов происходят практически синхронно.

Удельная энергия деформирования рассчитывалась для массива при условии, что $E = 5 \cdot 10^4$ МПа и $\nu = 0{,}25$.

Результаты расчетов приведены на рис.3. В блоке между реперами Р15-Р14 на пятнадцатом цикле измерений наблюдается резкое увеличение удельной энергии деформирования. Между реперами Р14-Р13 резкое увеличение энергии деформирования наблюдается также во время десятого цикла.

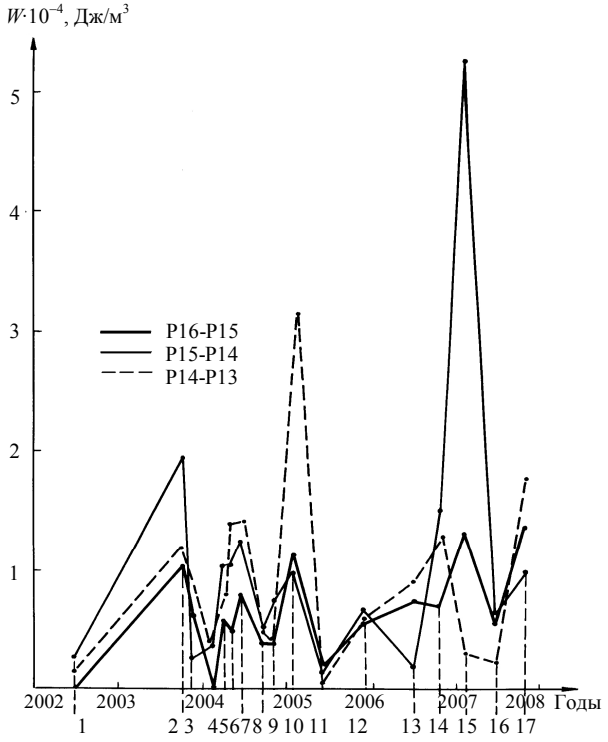


Рис.3. Изменение во времени дополнительной энергии деформирования по результатам измерений на подземном геодинамическом полигоне

Таким образом, в указанные периоды времени в блоках между реперами Р15-Р14 и Р14-Р13 происходили какие-то подвижки, возможно вызванные техногенными факторами.

На рис.4 показан характер деформирования пород в блоках между соседними реперами. Характер деформирования пород

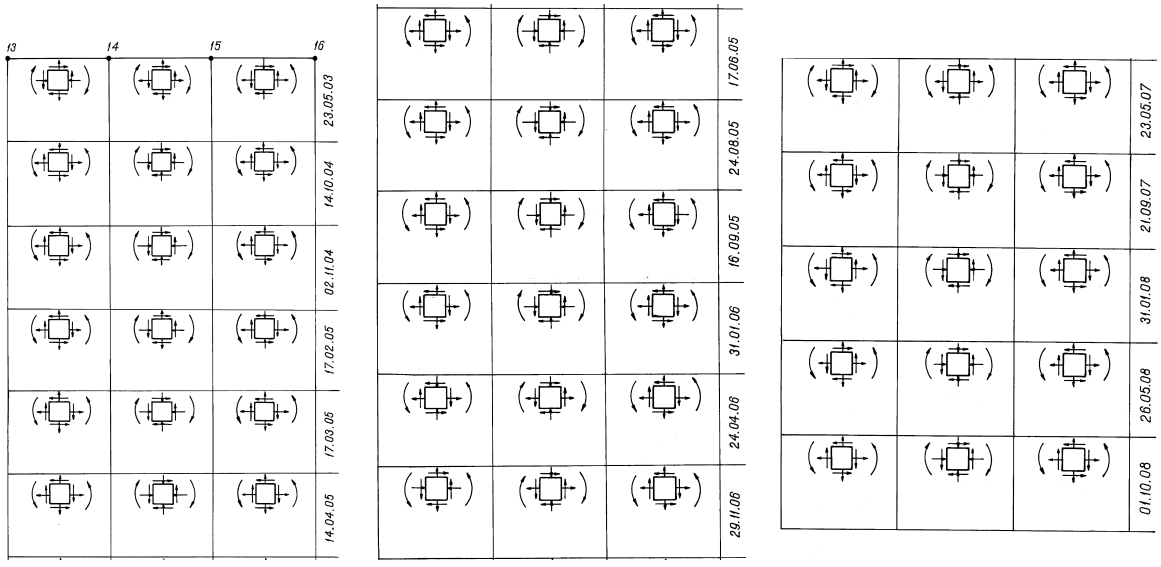


Рис.4. Характер деформирования массивов между соседними реперами

между реперами Р16-Р15 практически на всем протяжении времени остается постоянным. И в горизонтальном, и вертикальном направлениях породы испытывают деформации растяжения. При этом элементарный объем скашивается в сторону второго и четвертого квадрантов, т.е. сдвиговые деформации отрицательны. Блок на всем протяжении времени испытывает вращение против часовой стрелки, т.е. в сторону блока между реперами Р15-Р14. Блок между реперами Р15-Р14 при этом вращается в противоположную сторону, т.е. по направлению друг к другу. Исключение составляет лишь тринадцатый цикл, при котором оба блока вращаются в одном направлении. Деформации в горизонтальном и вертикальном направлениях имеют попеременный знак. Сдвиговые деформации практически все время остаются положительными, т. е. элементарный объем скашивается в сторону первого и третьего квадрантов. Блок между реперами Р14-Р13 вращается также по часовой стрелке, т.е. в сторону противоположную вращению блока между реперами Р15-Р14. Исключение также составляет тринадцатый цикл. Горизонтальные и вертикальные деформации этого участка массива растягивающие в большинстве случаев, а сдвиговые деформации отрицательны.

Таким образом, на данном участке массива наблюдается достаточно сложная картина распределения деформаций и вращений.

Выводы

1. Разработана методика определения компонент дополнительных тензоров деформаций, вращения и напряжений, массивов горных пород по результатам светодальномерных и нивелирных измерений на подземных геодинамических полигонах.

2. Установлено, что вертикальные и горизонтальные перемещения реперов во времени происходят синхронно. При этом породы между пунктами наблюдений вблизи разломной зоны испытывают поднятие.

3. В отдельные моменты времени удельная энергия деформирования на некоторых участках массива резко возрастает, причиной чему могут служить либо динамические события, происходящие в массиве, либо техногенная деятельность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Козырев А.А.* О причинах техногенного землетрясения при открытой разработке апатитовых месторождений Хибинского массива / А.А.Козырев, С.Н.Савченко, В.А.Мальцев //ФТПРПИ, 2005. № 3.С. 11-16.

2. Прогноз и профилактика горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений с позиций нелинейной геодинамики / Н.Н.Мельников, А.А.Козырев, С.Н.Савченко и др. // ФТПРПИ, 2001. № 4. С. 17-31.

3. Саамский разлом (Хибины) – аномальный характер современных деформаций / А.А.Козырев, Э.В.Каспарьян, Д.В.Жиров, Ю.Г.Смагина.// Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. ИФЗ РАН, М., 2008. Т.2. С.46-48.

4. *Савченко С.Н.* Ретроспективный анализ техногенного землетрясения на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г. / С.Н.Савченко, А.В.Ловчиков, А.А.Козырев // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика / Апатиты, 2004. Ч.1. С.170-179.

REFERENCES

1. *Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Maltsev V.A.* On causes of technogenic earthquake in open-pit mining of apatite deposits of the Khibini massif // FTPRPI. 2005. N.3. P.11-16.

2. *Melnikov H.N., Kozyrev A.A., Savchenko S.H.* et al. Prediction and prevention of mining-tectonic rock bursts and technogenic earthquakes in terms of nonlinear geodynamic // FTPRPI. 2001. N.4. P.17-31.

3. *Kozyrev A.A., Kasparyan E.V., Zhirov D.Y., Smagina Yu.C.* The Saamski fault (Khibini) - abnormal character of recent deformations // Tectonophysics and actual aspects of sciences on Earth. Inst. Phys. Moscow, RAS. 2008. V.2. P. 46-48.

4. *Savchenko S.H., Lovchikov A.V., Kozyrev A.A.* Retrospective analysis of technogenic earthquake at the Umbozero ore mine on 17.08.1999. Technogenic seismicity during mining works: models of origin, prediction, prevention / Apatity, 2004. Part 1. P.170-179.