УДК 622.833.5

С.В. Сентябов

УЧЕТ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ БЛОЧНОСТИ МАССИВА ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Теоретические и экспериментальные исследования доказывают, что иерархически блочный массив магматических и метаморфических горных пород ведет себя как упругая и изотропная среда, и установлено это при определении изменения природных напряжений в массиве на базе 5—7 рангов геоблоков, в результате которых формируются напряжения в приконтурной части ствола на базе 2—3 рангов геоблоков, которые упруго влияют на изменение напряженно-деформированного состояния бетонной крепи шахтных стволов. Представленые результаты проведенных исследований, в значительной мере повышают степень геомеханической изученности массива горных пород Гайского месторождения. В натурных условиях определялись параметры напряжений, действующих в крепи стволов на глубоких горизонтах рудника, производился мониторинг напряженно-деформированного состояния крепи стволов на различных горизонтах по всей глубине ствола в период 2013—2017 гг.

Ключевые слова: наблюдательная станция, деформации, мониторинг напряженно-деформированного состояния крепи стволов, переменные во времени напряжения, бетонная крепь, массив горных пород.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-161-166

Первая попытка определить модуль деформации массива горных пород, как функции рангов слагающих ее геоблоков была предпринята в 1990 г. Общепризнано, что нарушения, ограничивающие геоблоки, криволинейны. В результате этого на поверхности геоблока отмечаются впадины и выступы. В работе [9] показано, что линейная длина *a* выступов и впадин составляет десятую часть ребра геоблока. При относительном смещении смежных геоблоков по нарушению образуются полости и зоны опорного давления, которые распределяются по поверхности геоблока совершенно произвольно. Однако, учитывая что для конкретного геоблока $a \neq \text{const}$ и происходит переупаковка массива при образовании оперяющих трещин (образовании геоблоков низших рангов), появляются дополнительные зоны опорного давления, в результате чего, в среднем ширина полостей $a_п$ и зоны опорного давления $a_Д$ могут находиться в отношении $a_п/a_Д = 1 \div 1{,}5$ [1].

При использовании метода сингулярных интегральных уравнений (программа ELAST) [5] была просчитана деформация массива размером $\Delta = 10a$, рассеченного трещинами, для двух вариантов соотношений $a_п$ и $a_Д$ под нагрузкой, нормальной полости трещины. В результате расчетов было установлено, что модуль упругости массива, включающего *n* рангов геоблоков, составит: $E_м = A^n E_о$, где $A^n = 0{,}878^n$ — для условий $a_п = 1{,}5\, a_Д$; $A^n = 0{,}931^n$ — для условий $a_п = a_Д$.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 10. С. 161–166.
© С.В. Сентябов. 2017.

С 2013 г. по настоящее время при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований лабораторией геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН были продолжены экспериментальные работы по изучению изменения во времени напряженно-деформированного состояния (НДС) [4]. Для этого были оборудованы подземные наблюдательные станции в различных районах Урала вне зоны влияния горных работ в районе городов Краснотурьинск, Нижний Тагил, Березовский и Гай, на глубинах от 420 м до 1070 м.

Для подземных полигонов выбраны различно ориентированные выработки, в которых заложены реперные линии на базах 40—50 м. Расстояния между реперами измеряются рулеткой, по методике гибких нитей [2], что обеспечивает точность измерения изменения базы до 0,2 мм.

Обработка результатов заключалась в следующем:

• была выбрана наблюдательная база L_o измеренная, к примеру, относительно которой оценивали изменение длины в последующие замеры;

• по полученным изменениям длины линий $\Delta(L_i—L_o)$ определяли относительную деформацию массива горных пород ε_i;

• подбирали комбинации из трех линий и находили $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, МПа;

• после статистической обработки получают средние значения $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, α_1 и азимут действия $\Delta\sigma_1$;

• за весь период наблюдений находят средний азимут действия $\Delta\sigma_1$ или $\Delta\sigma_2$, который принимается за ось абсцисс X, и находили $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\tau_{xy}$, которые более наглядно характеризуют изменение напряжений во времени.

$$tg2\alpha_{1-1} = \frac{\left(E_I\varepsilon_I - E_{II}\varepsilon_{II}\right)\sin^2\alpha_{I-III} - \left(E_I\varepsilon_I - E_{II}\varepsilon_{II} - E_{III}\varepsilon_{III}\right)\sin^2\alpha_{I-II}}{\left(E_I\varepsilon_I - E_{III}\varepsilon_{III}\right)\sin2\alpha_{I-II} - \left(E_I\varepsilon_I - E_{II}\varepsilon_{II}\right)\sin2\alpha_{I-II}}$$

$$\Delta\sigma_{1,2} = \frac{A(1+\mu) \pm \left(E_I\varepsilon_I - E_{II}\varepsilon_{II}\right)(1-\mu)}{B(1-\mu^2)}$$

где $A = E_I\varepsilon_I\cos2(\alpha_{I-I} + \alpha_{I-III}) - E_{III}\varepsilon_{III}\cos2\alpha_{I-I}$; $B = \cos2(\alpha_{I-II} + \alpha_{I-III}) - \cos2\alpha_{I-II}$; $\alpha_{I-II} + \alpha_{I-III}$ — углы, отсчитываемые от первой реперной линии ко второй и третьей против хода часовой стрелки, град; α_{I-I} — азимут действия $\Delta\sigma_1$, отсчитываемый от направления $E_I\varepsilon_i$ по часовой стрелке, град; E_I, E_{II}, E_{III} — модули деформации массива на базе реперных линий; μ — коэффициент Пуассона массива; ε_I, ε_{II}, ε_{III} — относительная деформация массива на длине реперных линий [8].

Если судить по совпадению величин ε на Солнце и на Земле и времени достижения ими экстремумов при проецировании на излучающую способность Солнца S_o и принять во внимание то, что в нано- и пикоциклах Земля (земная кора) сжимается и расширяется объемно-равномерно в вертикальном и горизонтальном направлениях [6, 7, 8]. В процессе исследованием установлено, что НДС массива горных пород изменяется периодически (период 9—13 лет) на 10—20 МПа, приводя к относительной деформации массива до $\varepsilon = (2\div4)\cdot10^{-4}$ [3] представлены на рис. 1.

Анализ приведенных результатов показывает, что природные напряжения в земной коре изменяются во времени и не являются постоянными в дополнение к ранее выдвинутым гипотезам необходимо учитывать переменную, во времени составляющую $\sigma_{АФ}$.

$$\sigma_z^п = -\gamma H + \sigma_{zm} + \sigma_{АФ},\ \sigma_x^п = -\lambda\gamma H + \sigma_{xm} + \sigma_{АФ},\ \sigma_y^п = -\lambda\gamma H + \sigma_{ym} + \sigma_{АФ}.$$

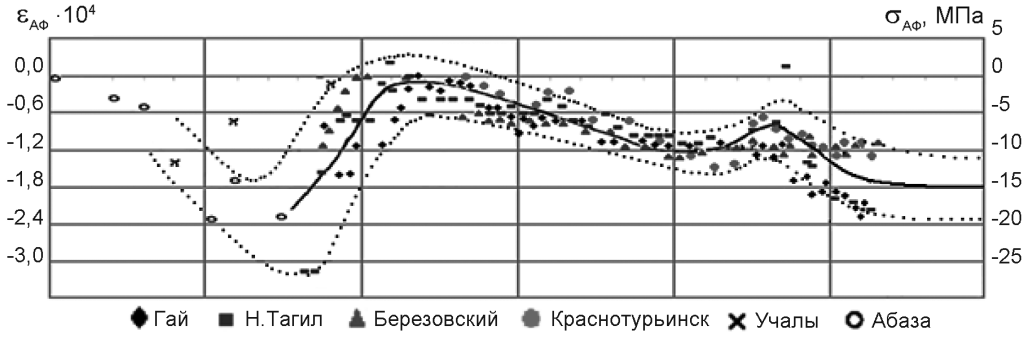

Рис. 1. Изменение НДС массива на рудниках в городах Урала и Алтая

Наряду с этими измерениями НСД массива горных пород были проведены измерения напряжений в бетонной крепи шахтных стволов. Стволы Гайского месторождения находятся в туфах андезитодацитового состава, имеющих модуль упругости в образце горной породы $E_о = 0{,}72 \cdot 10^5$ МПа.

Модуль упругости в массиве определяется по следующей формуле

$$E_м = 0{,}931^n \cdot E_о, \text{ МПа},$$

где $E_о$ — модуль упругости образца горной породы; n — количество рангов геоблоков.

При определении изменяющихся во времени природных напряжений измеряли деформацию базисов, имеющих длину 40—50 м в массивах со средним размером структурных блоков 0,5 м и коэффициентом вложения $\lambda = 2$ модуль упругости массива горных пород на этих базах при $n = 5$. Следовательно:

$$E_м = 0{,}93^n \cdot 0{,}72 \cdot 10^5 = 0{,}5 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

С 2013 по 2017 гг. в массиве было зафиксировано изменение природных напряжений $\Delta\sigma_{АФ}$:

$$\Delta\sigma_{АФ} = \Delta\varepsilon_м \cdot E_м = -6{,}2 \text{ МПа}.$$

На рис. 2 представлен график изменений переменных во времени напряжений в массиве пород Гайского месторождения с начала 2013 г.

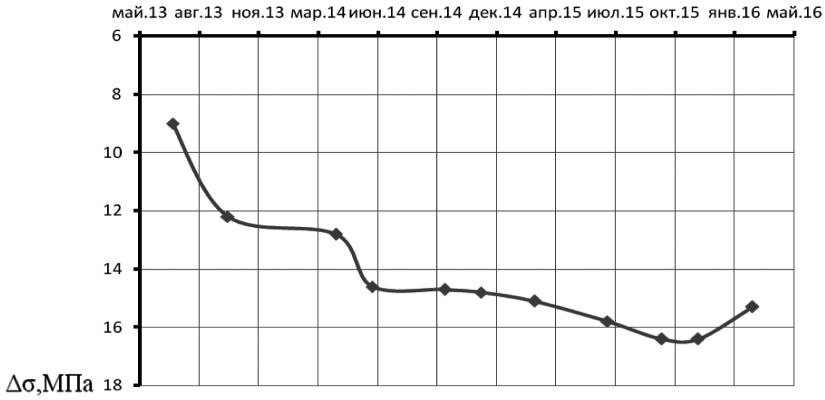

Рис. 2. График изменения переменных во времени напряжений в массиве пород Гайского месторождения

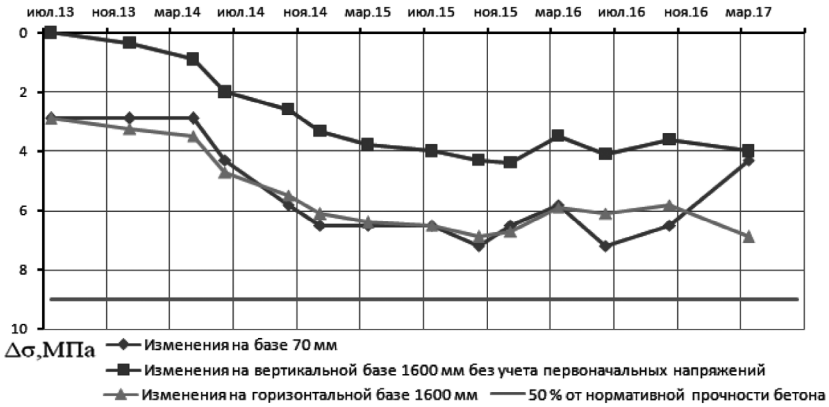

Рис. 3. График изменения напряжений в бетонной крепи ствола шахты «Клетевая» на горизонте -830 м

Эти напряжения создадут на породном контуре ствола напряжения при их двойной концентрации, равные:

$$\Delta\sigma_\theta = \Delta\sigma_{АФ} \cdot K_{конц}, \text{ МПа}, \quad \Delta\sigma_\theta = -6{,}2 \cdot 2{,}0 = -12{,}4 \text{ МПа}.$$

На бетонную крепь передаются напряжения, которые рассчитываются по формуле

$$\text{при } E_м = 0{,}93^n \cdot E_о = 0{,}62 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{б(р)} = \Delta\sigma_{ств}\frac{E_б}{E_п}, \text{ МПа}, \quad \Delta\sigma_{б(р)} = -12{,}4\frac{0{,}2 \cdot 10^5}{0{,}62 \cdot 10^5} = -4{,}0 \text{ МПа},$$

где n — количество рангов геоблоков, n = 2.

По измерениям напряжений в бетонной крепи шахтных стволов с 2013 по 2016 гг., имеющих длину базисов 1600 мм, получено

$$\sigma_{б(и)} = \frac{\varepsilon_x + \mu\varepsilon_z}{1-\mu^2}E_Б = -4{,}4 \text{ МПа},$$

Изменения напряжений во времени на различных базах, приведены на рис. 3 в период измерения в 2013—2017 гг. Т.е. измеренные и рассчитанные напряжения равны между собой $\Delta\sigma_{б(и)} = \Delta\sigma_{б(р)}$.

Анализ влияния иерархической блочности массива на НДС горных пород и элементов горных конструкций (крепи шахтных стволов) проводим используя аналитические зависимости связи между напряжениями в массиве и крепи. Для определения истинного коэффициента перехода A^n к модулю упругости массива $E_м$ от модуля упругости образца горной породы $E_о$ необходимо также производить при учете аналитических зависимостей. С учетом фактически замеренныного изменения переменных во времени напряжений в 2013—2017 г. $\sigma^Ф_{АФ}$ составили –6,2 МПа. Для этих условий определяем тангенциальные $\sigma_{\theta(к)}$ и радиальные $\sigma_{\rho(к)}$ напряжения в крепи.

$$\sigma_{\rho(к)} = \frac{A}{B}, \quad \sigma_{\theta(к)} = \frac{2\sigma_{\rho(к)}r_2^2}{\left(r_2^2 - r_1^2\right)}$$

$$\text{где } A = \frac{2\sigma_{Аф}\left(1-\mu_п^2\right)}{E_п}; \quad B = \frac{1+\mu_п}{E_п} + \frac{C}{E_Б}; \quad C = \frac{\left(1-\mu_Б\right)r_2^2 + \left(1+\mu_Б\right)r_1^2}{\left(r_2^2 - r_1^2\right)}$$

r_1, r_2 — радиус ствола в свету, в черне, м; $E_п$ — модуль упругости массива пород; μ — коэффициент Пуассона; $\sigma_{АФ}$ — астрофизические напряжения, МПа.

Изменение напряженного состояния в бетонной крепи и массиве горных пород в период измерения в 2013—2017 гг.

	2013—2014 гг.	2013—2015 гг.	2013—2017 гг.
A_0	0,88	0,91	0,93
$\Delta\sigma^{ф}_{АФ}$, МПа	–5,1	–5,8	–6,2
$\Delta\sigma_{к}$, МПа	–2,4	–4,0	–4,4
$\Delta\sigma^{ист}_{АФ}$, МПа	–4,4	–6,2	–7,8

После проведенных вычислений получаем $\sigma_{\theta(к)} = (*)A^{п}_{0}$ сравниваем полученные напряжения в крепи с фактически замеренными $\Delta\sigma_{к}$ и с учетом количества рангов геоблоков получаем коэффициент перехода $A^{п}_{0} = \frac{\Delta\sigma_{г}}{(*)}$ с учетом которого определяем истинное значение астрофизических напряжений $\sigma^{ист}_{АФ}$ представлены в таблице.

К главным геомеханическим факторам, влияющим на эффективность и безопасность горных работ, следует отнести физико-механические свойства массива, а не образца, природные напряжения в массиве горных пород и их концентрацию в приконтурном массиве горных выработок.

Представленные уточнения в методы расчета напряжений и выявленные закономерности формирования напряженного состояния в монолитной бетонной крепи вертикальных стволов являются методической основой расчета напряжений в ней на любой глубине в интересующий нас период времени и обоснования путей безопасной эксплуатации горных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубков А. В., Зубков Ю. М.* Модуль деформации массива горных пород — функция рангов слагающих ее блоков / Геомеханика и напряженное состояние земных недр: Материалы Международной конференции, Новосибирск, 4—7 октября 1999 г. — Новосибирск, 1999. — С. 65—70.

2. *Зубков А. В.* Геомеханика и геотехнология. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. — 333 с.

3. *Зубков А. В.* Периодическое расширение и сжатие Земли как вероятный механизм природных катаклизмов // Литосфера. — 2013. — № 2. — С. 145—155.

4. *Зубков А. В., Селин К. В., Сентябов С. В.* Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части Земной коры // Литосфера. — 2015. — № 6. — С. 116—129.

5. *Машуков В. И., Чупрова Л. В., Лоскутова Л. И.* Решение плоской задачи теории упругости для многосвязных областей / Отраслевой фонд алгоритмов и программ: Материалы Международной конференции, Новосибирск, 1982 г. — Новосибирск, 1982. — С. 155—164.

6. *Распопов О. М., Дергачев В. А.* Долговременные тренды в модуляции космических лучей солнечным ветром за последние 150 лет / Эффекты модуляции космических лучей солнечным ветром. — СПб.: ИЗМИ РАН, 2003. — С. 10—24.

7. *Русинов Ю. И.* Ионосфера в едином поле волн [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http: // comm. roscosmos. ru/Docs/RusF2.dos) или (www.ntpo.com) в разделе «Тайны космоса» 2008.

8. *Тарасов Б. Г.* Пульсация земли и цикла геодинамической активности в потоках космической плазмы. — СПб.: МАНЭБ, 2009. — 319 с.

9. *Шуплецов Ю. П.* К расчету устойчивости и сейсмической опасности тектонических нарушений при разработке месторождений полезных ископаемых / X Межотраслевое координационное совещание по проблемам геодинамической безопасности, материалы, Екатеринбург, 1997 г. — Екатеринбург, 1997 — С. 189—194. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Сентябов Сергей Васильевич — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: sentyabov1989@mail.ru,
Институт горного дела УрО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 10, pp. 161–166.

UDC 622.833.5

S.V. Sentyabov

TAKING INTO ACCOUNT HIERARCHICAL BLOCK STRUCTURE OF ROCK MASS WHEN SOLVING GEOMECHANICAL PROBLEMS

Theoretical and experimental studies show that the hierarchical block array of igneous and metamorphic rock behaves as an elastic and isotropic medium, and installed it in determining the changes in natural stress in an array on the basis of grades 5—7 geoblocks, which are formed as a result of stress in the marginal rock of the barrel on the basis of grades 2—3 geoblocks that elastically influence the change of the stress-strain state of concrete lining shafts. Presentation of the results of the research, largely increasing the degree of knowledge of the geotechnical rock mass of Ai field. parameters of stress were determined in field conditions in force in the lining of trunks in the deep horizons of the mine, to monitor the stress-strain state of the lining shafts at different levels throughout the depth of the barrel in the period 2013—2017 years.

Key words: observation station, deformation, monitoring of the stress-strain state of the lining shafts, variable voltage in time, concrete lining, rock massif.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-161-166

AUTHOR

Sentyabov S.V., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Institute of Mining of Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
620075, Ekaterinburg, Russia, e-mail: sentyabov1989@mail.ru.

REFERENCES

1. Zubkov A. V., Zubkov Yu. M. *Geomekhanika i napryazhennoe sostoyanie zemnykh nedr: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii*, Novosibirsk, 4—7 oktyabrya 1999 g. (Geomechanics and the stressed state of the earth's interior: Materials of International Conference, Novosibirsk, October 4—7, 1999), Novosibirsk, 1999, pp. 65—70.

2. Zubkov A. V. *Geomekhanika i geotekhnologiya* (Geomechanics and Geotechnology), Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2001, 333 p.

3. Zubkov A. V. *Litosfera*. 2013, no 2, pp. 145—155.

4. Zubkov A. V., Selin K. V., Sentyabov S. V. *Litosfera*. 2015, no 6, pp. 116—129.

5. Mashukov V. I., Chuprova L. V., Loskutova L. I. *Otraslevoy fond algoritmov i programm: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii*, Novosibirsk, 1982 g. (Branch Fund of Algorithms and Programs: Materials of International Conference, Novosibirsk, 1982), Novosibirsk, 1982, pp. 155—164.

6. Raspopov O. M., Dergachev V. A. *Effekty modulyatsii kosmicheskikh luchey solnechnym vetrom* (Effects of modulation of cosmic rays by the solar wind), Saint-Petersburg, ИЗМИ РАН, 2003, pp. 10—24.

7. Rusinov Yu. I. Ionosfera v edinom pole voln, available at: http// comm. roscosmos. ru/Docs/RusF2.dos) or (www.ntpo.com) in the «Secrets of the Cosmos» section.

8. Tarasov B. G. *Pul'satsiya zemli i tsikla geodinamicheskoy aktivnosti v potokakh kosmicheskoy plazmy* (Pulsation of the Earth and the cycle of geodynamic activity in cosmic plasma flows), Saint-Petersburg, MANEB, 2009, 319 p.

9. Shupletsov Yu. P. *X Mezhotraslevoe koordinatsionnoe soveshchanie po problemam geodinamicheskoy bezopasnosti, materialy*, Ekaterinburg, 1997 g. (X Interindustry Coordination Meeting on Problems of Geodynamic Safety, Materials, Ekaterinburg, 1997), Ekaterinburg, 1997, pp. 189—194.