

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ НАТУРНЫХ ЗАМЕРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛЬШИХ УЧАСТКОВ ГОРНОГО МАССИВА**

**А.Д. Сашурин, А.Е. Балек**

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
Екатеринбург, Россия

Представлено обоснование новой методики натуральных замеров природных (первоначальных) тектонических напряжений и модулей деформации наиболее крупномасштабных из рассматриваемых в геомеханике баз измерений и объемов горных массивов: соизмеримых с размерами месторождений и горных отводов. В качестве возмущающей полости используются карьеры и провалы, формирующиеся при ведении подземных горных работ системами с обрушением. Методика базируется на использовании результатов прямых спутниковых (по технологиям GPS, ГЛОНАСС и др.) замеров смещений реперных пунктов, заблаговременно установленных в окрестностях возмущающей полости в зоне упругого деформирования вмещающего горного массива, с последующим перерасчетом замеренных деформаций в компоненты природного поля напряжений и модуля упругости массива. Карьеры и зоны обрушения аппроксимируются эллиптическими или круговыми отверстиями, вынутыми из предварительно напряженной упругой изотропной плоскости в условиях плоского напряженного состояния. Смещения реперов, вызванные выемкой отверстия, представляются через разность между смещениями, обусловленными нагружением плоскости с отверстием, и смещениями, вызванными нагружением той же плоскости без отверстия.

Методика позволяет учесть пространственно-временную изменчивость полей напряжений и деформаций, обусловленную блочно-иерархической структурой и разномодульностью пород.

Представлен пример замеров напряженно-деформированного состояния горного массива месторождения «Трубка Удачная» АК «АЛРОСА».

**Ключевые слова:** горный массив, геомеханика, напряженно-деформированное состояние, натурные замеры, мониторинг сдвижений, рудные месторождения.

## **IMPROVEMENT OF FIELD MEASUREMENT OF STRESS-DEFORMED STATE OF THE LARGE MASSIF PARTS**

**A.D. Sashurin, A.E. Balek**

The Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russian Federation

The paper presents motivation for a new technique of field measurements of natural tectonic stress and deformation modulus of the largest spacings and massifs (comparable with reservoirs and mining claims) documented in geomechanics is presented. Open pits and caves formed during the underground mining by systems with sloughing are chosen as active vesicles. The method is based on using the results of the direct satellite measurements (GPS, GLONASS and others) of the shifting reference marks preinstalled near the active vesicles within the zone of elastic deformation of the massif followed by converting the deformations measured into the components of a natural stress field and a massif elasticity modulus. Open pits and caves are approximated by elliptic and round holes made in the elastic preliminary stressed isotropic plane in the stress-deformed state. Displacement of reference marks, caused by hole removal, is determined as a difference between the shifts conditioned by loading the plane with holes and the shifts related to the loading of the same plane without holes. The method described allows taking account of space-time variability of stress and deformation fields, determined by block-hierarchical structure and different rock moduli. An example is offered of measuring stress-deformed state of the Trubka Udachnaia deposit massif developed by OJSC ALROSA.

**Keywords:** rock massif, geomechanics, stress-deformed state, field measurements, shift monitoring, ore deposits.

**Базовые положения  
экспериментально-аналитического  
метода**

Основу деформационных методов оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива составляет решение обратной геомеханической задачи по замеренным деформациям, вызванным воздействием тех или иных возмущений первоначального поля напряжений [1, 2]. На практике обычно используют целенаправленные перераспределения напряжений, произошедшие вследствие выемки в напряженном массиве полостей с известными формой и размерами: скважин, щелей, выработок, выработанных пространств и пр. При выполнении расчетов предполагается, что имеет место упругое деформирование сплошной однородной и, как правило, изотропной среды с однородным полем первоначальных напряжений [3].

В практике Института горного дела УрО РАН для натуральных замеров крупномасштабных полей напряжений, соизмеримых с размерами месторождений и горных отводов, в качестве возмущающих полостей рассматриваются карьеры и зоны обрушения от подземных разработок [4–7]. Упругие деформации окружающего массива определяются по замерам смещений тех реперных пунктов, которые были заранее установлены в пределах будущей области упругого деформирования, т.е. в зоне влияния полости, но вне мульды гравитационного оседания породной толщи. Для этого используются репера маркшейдерских наблюдательных станций, закладываемые на шахтах и карьерах для мониторинга процессов сдвижения. Отметим, что метод прямых замеров для определения компонент природного поля напряжений широко используется и зарубежными специалистами [3, 8].

Поскольку основной целью натуральных замеров является выявление тектонических составляющих НДС, которые дей-

ствуют в горизонтальной плоскости и определяются величиной и направлением главных нормальных напряжений окружающего массива, решение обратной геомеханической задачи осуществляется для условий плоского напряженного состояния по смещениям точек земной поверхности. Карьер или зона обрушения аппроксимируются в рассматриваемой напряженной плоскости эллиптическим или, в частном случае, круговым отверстием.

В соответствии с принципом суперпозиции смещения, вызванные выемкой в упругой изотропной плоскости эллиптического отверстия, могут быть представлены как разность между смещениями, обусловленными нагружением плоскости с отверстием, и смещениями, вызванными нагружением плоскости без отверстия. С использованием результирующих составляющих вектора смещений данное условие запишется следующим образом:

$$U_x = U'_x - U''_x, \quad (1)$$

$$U_y = U'_y - U''_y, \quad (2)$$

где  $\mathbf{U}$  – вектор горизонтальных смещений рассматриваемой точки поверхности упругой изотропной плоскости, м,  $\mathbf{U} = \sqrt{U_y^2 + U_x^2}$ ;  $U_x$  и  $U_y$  – составляющие вектора  $\mathbf{U}$  (соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ), вызванные образованием отверстия в напряженной упругой изотропной плоскости, м;  $U'_x$  и  $U'_y$  – составляющие смещений (по тем же направлениям), вызванные нагружением плоскости с уже имеющимся отверстием, м;  $U''_x$  и  $U''_y$  – смещения, обусловленные нагружением плоскости без отверстия, м.

При решении задач геомеханики численные значения векторов смещений для точек земной поверхности определяются на основе функций комплексных переменных Н.И. Мусхелишвили [9] по следующим формулам, вывод которых подробно представлен в монографии [4]:

$$\begin{aligned}
 U'_X &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} (N_1 - N_3 + N_5) + \\
 &+ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} (N_2 - N_4 + N_6 - N_7), \\
 U'_Y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} (N_8 - N_{10} + N_{12}) + \\
 &+ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} (N_9 - N_{11} + N_{13} - N_{14}), \\
 U''_X &= \frac{\sigma_1 - \mu\sigma_2}{2G(1+\mu)} k_2 \cos \alpha - \frac{\sigma_2 - \mu\sigma_1}{2G(1+\mu)} k_3 \sin \alpha, \\
 U''_Y &= \frac{\sigma_1 - \mu\sigma_2}{2G(1+\mu)} k_2 \sin \alpha + \frac{\sigma_2 - \mu\sigma_1}{2G(1+\mu)} k_3 \cos \alpha, \\
 N_1 &= \frac{\chi(a+b)}{4\rho} (\rho^2 - m) \cos \theta, \\
 N_2 &= \frac{\chi(a+b)}{2\rho} \cos(\theta - 2\alpha), \\
 N_3 &= \frac{(a+b)}{4\rho k_1} \times \\
 &\times [m\rho^2 (\rho^2 - m) \cos 3\theta + (\rho^6 - m^3) \cos \theta], \\
 N_4 &= \frac{(a+b)}{2\rho k_1} \times \\
 &\times [m \cos(\theta - 2\alpha) - \rho^4 \cos(3\theta + 2\alpha)], \\
 N_5 &= \frac{(a+b)\rho}{2k_1} (m^2 + 1)(\rho^2 - m) \cos \theta, \\
 N_6 &= \frac{(a+b)\rho}{2} \cos(\theta + 2\alpha), \\
 N_7 &= \frac{(a+b)}{2\rho k_1} [m(\rho^4 - 1) \cos(\theta + 2\alpha) + \\
 &+ \rho^2 \cos(3\theta + 2\alpha) - m^2 \rho^2 \cos(\theta - 2\alpha)], \\
 N_8 &= \frac{\chi(a+b)}{4\rho} (\rho^2 + m) \sin \theta, \\
 N_9 &= -\frac{\chi(a+b)}{2\rho} \sin(\theta - 2\alpha), \\
 N_{10} &= \frac{(a+b)}{4\rho k_1} \times \\
 &\times [m\rho^2 (\rho^2 + m) \sin 3\theta + (\rho^6 - m^3) \sin \theta], \\
 N_{11} &= \frac{(a+b)}{2\rho k_1} \times \\
 &\times [m^2 \sin(\theta - 2\alpha) + \rho^4 \sin(3\theta + 2\alpha)], \\
 N_{12} &= \frac{(a+b)\rho}{2k_1} (m^2 + 1)(\rho^2 + m) \sin \theta, \\
 N_{13} &= -\frac{(a+b)\rho}{2} \sin(\theta + 2\alpha), \\
 N_{14} &= \frac{(a+b)}{2\rho k_1} [m(\rho^4 - 1) \sin(\theta + 2\alpha) + \\
 &+ \rho^2 \sin(3\theta + 2\alpha) + m^2 \rho^2 \sin(\theta - 2\alpha)], \\
 k_1 &= \rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2, \\
 k_2 &= \frac{a+b}{2} \times \\
 &\times \left[ \left( \rho - \frac{m}{\rho} \right) \sin \theta \sin \alpha + \left( \rho + \frac{m}{\rho} \right) \cos \theta \cos \alpha \right], \\
 k_3 &= \frac{a+b}{2} \times \\
 &\times \left[ \left( \rho - \frac{m}{\rho} \right) \sin \theta \cos \alpha - \left( \rho + \frac{m}{\rho} \right) \cos \theta \sin \alpha \right].
 \end{aligned}$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные нормальные напряжения нетронутого горного массива, действующие в горизонтальной плоскости за пределами зоны влияния цилиндрической полости (сжимающие напряжения приняты со знаком «минус», т.е.  $\sigma_1 > \sigma_2$ ), МПа;  $G$  – модуль сдвига горного массива, МПа,  $G = 0,5E/(1 + \mu)$ ,  $E$  – модуль упругости массива, МПа,  $\mu$  – коэффициент Пуассона массива;  $\chi$  – коэффициент Колосова – Мухелишвили для условий плоского напряженного состояния,  $\chi = (3 - \mu)/(1 + \mu)$ ;  $a$  и  $b$  – соответственно

малая и большая полуоси эллипса в основании цилиндрической полости, аппроксимирующей карьер или провал зоны обрушения,  $m$ ;  $m$  – модуль эллипса,  $m = (a - b)/(a + b)$ ;  $\alpha$  – угол, определяющий направление оси  $\sigma_1$  главных нормальных напряжений нетронутого массива (отсчитывается от оси  $X$  против часовой стрелки). Координата  $X$  совпадает с большой полуосью эллипса  $a$ , а  $Y$  – с малой полуосью  $b$ ;  $\rho$  и  $\theta$  – криволинейные эллиптические координаты расчетной точки земной поверхности относительно центральной оси цилиндрической полости,  $m$  и град.

Эллиптические координаты  $\rho$  и  $\theta$  связаны с прямоугольными координатами  $x$  и  $y$  следующими соотношениями:

$$x = \frac{a+b}{2} \left( \rho + \frac{m}{\rho} \right) \cos \theta,$$

$$y = \frac{a+b}{2} \left( \rho - \frac{m}{\rho} \right) \sin \theta.$$

Для полости круглой формы, представляющей частный случай эллиптической с полуосями  $a = b$ , вышеприведенные формулы существенно упрощаются и сводятся к нахождению результирующих составляющих вектора горизонтальных смещений в полярной системе координат:

$$U_r = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} A \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} C, \quad (3)$$

$$U_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} B \sin 2\theta, \quad (4)$$

где  $A = \frac{C^2}{r} - C(\chi + 1)$ ,  $B = \frac{C^2}{r} + C(\chi - 1)$ ,

$C = \frac{R^2}{r}$ ,  $R$  – радиус цилиндрической полости, аппроксимирующей карьер или воронку обрушения,  $m$ ;  $r$  и  $\theta$  – полярные координаты расчетной точки земной поверхности относительно центральной оси цилиндрической полости (угол  $\theta$  отсчи-

тывается от  $\sigma_1$  против часовой стрелки),  $m$  и град;  $U_r$ ,  $U_\theta$  – результирующие составляющие вектора горизонтальных смещений рассматриваемой точки земной поверхности  $U = \sqrt{U_r^2 + U_\theta^2}$  соответственно в радиальном и тангенциальном (т.е. по касательной к окружности цилиндрической полости) направлениях,  $m$ . Составляющая  $U_r$  имеет знак «минус» при направлении в сторону полости и знак «плюс» – при направлении от нее. Составляющая  $U_\theta$  со знаком «минус» при направлении против часовой стрелки относительно центральной оси полости и «плюс» – при направлении по часовой стрелке.

### Обоснование методики натуральных замеров

Измерение полных векторов горизонтальных смещений точек земной поверхности, сравнительно недавно представлявшее существенную проблему, в настоящее время с достаточной точностью и оперативностью осуществляется технологиями спутниковой геодезии и радарной интерферометрии [5, 6, 10–12]. Решение системы уравнений, составленных из выражений (1)–(2) либо (3)–(4) по комбинациям замеренных векторов позволяет находить неизвестные характеристики НДС горного массива: как силовые – величину и ориентировку главных компонентов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  тензора первоначальных напряжений, так и деформационные – модуль упругости и коэффициент Пуассона массива.

Однако сложность заключается в том, что не все искомые неизвестные представляют собой независимые физические параметры. В частности, имея данные только о геометрии возмущающей полости и о смещениях окружающего массива при сколь угодно большом числе замеренных векторов и любом их расположении без знания модуля упругости массива невозможно определить значения главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , а без

знания величины коэффициента Пуассона массива – соотношения главных напряжений. На разрешение данной проблемы и направлена предлагаемая методика.

Анализ уравнений (1)–(4) свидетельствует о том, что при изменениях коэффициента Пуассона в пределах  $\mu = 0,2 \dots 0,3$ , характерных для скальных горных пород, результат решения уравнений изменяется в пределах нескольких процентов. Таким образом, изменчивостью коэффициента Пуассона вполне можно пренебречь.

При принятии параметра  $\mu$  в качестве известной величины нахождение остальных параметров НДС возможно двумя способами:

*1-й способ.* Задавая различные значения модуля упругости массива  $E$  для каждого замеренного вектора горизонтальных смещений решением системы из двух уравнений: (1)–(2) – при выемке эллипсоидной в плане полости или (3)–(4) – при круглой, определяем соотношение главных нормальных напряжений  $\sigma_2/\sigma_1$  и ориентировку их осей: угол  $\alpha$  или угол  $\theta$  соответственно.

Для круглой в плане цилиндрической полости при задании  $\sigma_1 = -1$  МПа решение системы уравнений (3)–(4) имеет следующие корни:

$$\sin 2\theta = \frac{a}{k_4^2 + A^2 T^2}, \quad (5)$$

где

$$a = -CTk_4 \pm \sqrt{C^2 T^2 - (k_4^2 + A^2 T^2)(C^2 T^2 - A^2 T^2)}; \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{T + B \sin 2\theta}{-B \sin 2\theta},$$

где  $T = 4GU_0$ ;  $D = 4GU_r$ ;  $k_4 = B(D + 2C)$ .

Из двух корней  $\sigma_2$  принимается то значение, которое соответствует сжимающим напряжениям и отвечает условию  $\sigma_1 > \sigma_2$ . Уточнение значения угла  $\theta$ ,

определяемого выражением (5) по всему диапазону от 0 до 360°, производится путем подстановки  $\sigma_2$  в уравнение (3) и вычисления косинуса угла  $2\theta$ . В итоге принимается тот угол  $2\theta$ , где квадранты для синуса и косинуса совпадают.

Для эллипсоидной полости аналогичное аналитическое решение, которое не приводится здесь по причине громоздкости, имеет система уравнений (1)–(2).

После нахождения первоначальных напряжений массива по всем замеренным векторам выполняется сравнительный анализ вариации полученных данных при различных значениях модуля упругости массива  $E$ . В итоге принимается то значение модуля, а также соответствующие этому модулю соотношения главных нормальных напряжений массива  $\sigma_2/\sigma_1$  и их ориентировки, при котором среднеквадратическое отклонение расчетных углов  $\alpha$  или  $\theta$  от их среднеарифметического значения оказывается минимальным.

Способ выгодно отличается сравнительной простотой и возможностью нахождения всех неизвестных параметров через строгие аналитические решения. Однако он имеет существенный недостаток, обусловленный нелинейностью базовых зависимостей (1)–(4): вне зависимости от положения той или иной реперной точки и вектора ее смещений с увеличением задаваемых значений модуля упругости расчетное направление большей оси тензора напряжений  $\sigma_2$  начинает быстро приближаться к азимутальному направлению этой точки, т.е. к углу  $\theta = 90^\circ$ . В итоге конечный результат оказывается в зависимости от равномерности распределения реперов вокруг полости. На соотношение  $\sigma_2/\sigma_1$  при этом начинает более сильно влиять коэффициент Колосова – Мусхелишвили и, соответственно, коэффициент Пуассона. Кроме того, при данном подходе модуль упругости массива принимается одина-

ковым для всех точек. Это допущение само по себе требует обоснования.

*2-й способ.* Путем перебора попарных комбинаций замеренных векторов решением системы из четырех уравнений, составленных из выражений (1)–(2) или (3)–(4), находятся три неизвестных параметра: соотношение главных напряжений  $\sigma_2/\sigma_1$ , направление их осей (через угол  $\alpha$  или  $\theta$ ) и модуль упругости массива  $E$ , определяемый через модуль сдвига, выраженный в долях минимальных напряжений, т.е. через отношение  $E/\sigma_1$ .

Для облегчения задачи и удобства анализа результатов расчеты осуществляются в два этапа. Первоначально для каждого из замеренных векторов решением системы из двух уравнений определяется совокупность возможных значений  $E$  и  $\sigma_2/\sigma_1$  по всему диапазону азимутов оси  $\sigma_2$ : от 0 до 180°, удовлетворяющих критерию наличия сжимающих напряжений и соблюдению условия  $\sigma_1 > \sigma_2$ .

Для круглой в плане полости при задании  $\sigma_1 = -1$  МПа в корнях  $E$  и  $\sigma_2/\sigma_1$  система уравнений (3)–(4) имеет следующее аналитическое решение:

$$\sigma_2 = \frac{CU_\theta - BU_r \sin 2\theta - AU_\theta \cos 2\theta}{CU_\theta + BU_r \sin 2\theta + AU_\theta \cos 2\theta}, \quad (7)$$

$$E = \frac{-B \sin 2\theta (\sigma_2 + 1)(1 + \mu)}{2U_\theta}. \quad (8)$$

Аналогичное решение, не представленное по причине громоздкости, в корнях  $E$  и  $\sigma_2/\sigma_1$  имеет и система уравнений (1)–(2) для эллипсовидной полости.

Дальнейшие расчеты сводятся к отысканию таких попарных комбинаций векторов смещений, которые при одинаковых значениях  $\sigma_2/\sigma_1$  и  $E$  имеют одно и то же направление осей главных напряжений. Очевидно, что такая задача аналитического решения уже не имеет и может быть решена только численно, поскольку, по сути, представляет собой отыскание точки пересечения трех кри-

вых в трехмерном пространстве или в двухмерном – четырех независимых нелинейных функций  $f(\alpha, \sigma_2/\sigma_1)$  и  $f(\alpha, E)$  для каждой из пар векторов. На практике такое решение удобнее всего осуществлять графически: отрисовывать кривые на экране компьютера и при заданной точности выявлять общие углы  $\alpha$  для точек пересечений этих функций на двухмерных графиках: в осях  $\alpha - \sigma_2/\sigma_1$  и  $\alpha - E$ . При этом для угла  $\alpha$  задается определенный уровень точности, например  $\pm 5^\circ$ , а также рассматривается только реально возможный диапазон соотношений между главными напряжениями нетронутого массива:  $1 \leq (\sigma_2/\sigma_1) < 5$ .

### Пример практического применения методики

Институтом горного дела УрО РАН по результатам анализа натуральных наблюдений за деформациями бортов карьера «Удачный» впервые была получена экспериментальная информация о поле первоначальных напряжений и об относительных деформационных характеристиках горного массива месторождения «Трубка Удачная» АК «АЛРОСА» на базах порядка нескольких километров. Были использованы результаты инструментальных GPS-наблюдений ООО ЦПИП «Генезис-Центр» за период с 1997–2000 по октябрь 2009 г. за горизонтальными смещениями тех реперных пунктов, которые отражают деформирование горного массива, обусловленное выемкой карьера, и на смещения которых не повлияли локальные деформационные проявления, вызванные негеомеханическими факторами: оседания бровок и отдельных породных блоков, процессы промерзания, оттаивания, заболачиваемости и пр.

На основании анализа с использованием оригинальной методики Института горного дела УрО РАН [6] была обоснована правомерность применения аналитических методов и модели механики

сплошной упругой среды для расчетов НДС по векторам сдвижений 29 реперных пунктов, представленных на рис. 1. На плане земной поверхности пунктиром отмечены внешние границы карьера «Удачный» с размерами 2000×1900 м и границы его днища с размерами 600×260 м. Вынутые за период с 1999–2000 по октябрь 2009 г. породные объемы (порядка 40 млн м<sup>3</sup>) аппроксимированы полостью в форме прямого (с перпендикулярной основанию образующей) цилиндра, имеющего в основании эллипс с полуосями  $a = 300$  м;  $b = 130$  м. Координатная ось  $X$  направлена с запада на восток и совпадает с большой полуосью  $a$ , а ось  $Y$  направлена с юга на север и совпадает с малой полуосью  $b$ .

Вмещающие породы представлены песчанистыми, глинистыми и водорослевыми известняками и доломитами, слабыми и весьма слабыми, с пределом прочности на одноосное сжатие 10–35 и 4–10 МПа соответственно. По степени нарушенности породный массив районирован следующим образом: восточный

борт карьера – нарушенность очень высокая (более 12 систем трещин); южный борт – нарушенность высокая (10–12 систем трещин); юго-западный и западный борт – нарушенность средняя (8–10 систем трещин); северный борт – нарушенность низкая (6–8 систем трещин).

Расчеты НДС выполнены обоими вышеизложенными способами для следующих граничных условий:  $a = 130$  м,  $b = 300$  м,  $\mu = 0,3$  (соответственно  $m = 0,4$  и  $\chi = 2$ ),  $\sigma_1 = -1$  МПа.

Решение системы уравнений (1)–(2) первым способом (т.е. в корнях  $\sigma_2/\sigma_1$  и  $\alpha$  путем перебора задаваемых значений модуля упругости массива  $E$ ) дало 29 пар корней, удовлетворяющих критерию наличия сжимающих напряжений и соблюдению условия  $\sigma_1 > \sigma_2$ . Сопоставительный анализ полученных значений углов  $\alpha$  показал, что минимальное стандартное отклонение ( $52^\circ$ ) достигается при  $E = 1700$  МПа. Соответствующие этому модулю параметры НДС представлены в табл. 1.

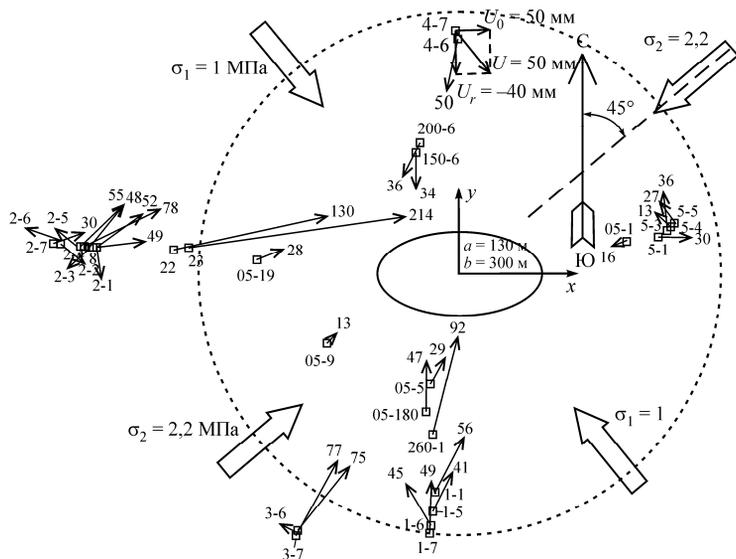


Рис. 1. Схема проведения натуральных замеров и расчета НДС горного массива вокруг вынутых в период с 1997–2000 по 2009 г. объемов карьера «Удачный», аппроксимированных эллипсоидной цилиндрической полостью

Таблица 1

Результаты оценки НДС горного массива в окрестностях карьера «Удачный» по векторам сдвижений реперных пунктов для условий  $\sigma_1 = -1$  МПа,  $E = 1700$  МПа

Наименование пункта	Эллиптические координаты пункта		Составляющие вектора сдвижения, м		Расчетное значение $\sigma_2$ , МПа	Азимут оси $\sigma_2$ , град
	$\rho$ , доли $R$	$\theta$ , град	$U_x$	$U_y$		
1	2	3	4	5	6	7
Южный борт						
260-1	2,8	261	0,023	0,089	-1,2	40
1-1	3,65	264	0,026	0,05	-1,7	64
1-5	3,98	263	0,019	0,036	-1,7	70
1-6	4,22	263	-0,024	0,038	-2,4	128
1-7	4,33	263	0,002	0,049	-1,2	137
05-5	2,05	258	0,014	0,025	-1,9	103
05-180	2,49	257	0,001	0,047	-1,6	115
Юго-западный борт						
3-6	4,95	237	0,047	0,058	-1,6	56
3-7	5,05	238	0,038	0,067	-1,5	21
05-9	2,53	209	0,009	0,01	-1,9	156
Западный борт						
2-1	5,87	176	0,042	0,03	-3,2	41
2-2	5,93	176	0,049	0,006	-1,6	55
2-3	6,01	176	0,031	0,036	-3,8	38
2-4	6,07	176	0,07	0,034	-3,5	48
2-5	6,14	176	0,04	0,038	-3,9	40
2-6	6,47	176	0,022	-0,018	-2,3	153
2-7	6,58	176	0,028	0,01	-1,9	37
05-19	4,6	175	0,212	0,03	-1,8	20
22	4,35	174	0,127	0,029	-4,3	63
23	5,87	176	0,042	0,03	-2,8	59
Северный борт						
4-6	3,86	91	-0,01	-0,049	-1,4	58
4-7	4,01	91	0,033	-0,040	-2,4	121
150-6	1,94	155	-0,001	-0,034	-1,8	62
200-6	2,08	158	-0,017	-0,032	-2,1	57
Восточный борт						
5-1	3,14	11	0,03	0	-2,6	172
5-3	3,31	12	-0,004	0,036	-2,7	166
5-4	3,38	13	-0,012	0,006	-1,9	160
5-5	3,48	14	-0,016	0,022	-2,5	145
05-1	2,6	13	-0,015	-0,005	-1,8	171

Результаты решения той же системы вторым способом в корнях  $E$  и  $\sigma_2/\sigma_1$  приведены на рис. 2 и 3 в форме двухмерных графиков в осях: азимут оси  $\sigma_2$  – отношение  $\sigma_2/\sigma_1$  (см. рис. 2) и азимут оси  $\sigma_2$  – модуль  $E$  (см. рис. 3) для всех возможных азимутков максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_2$ , приведенных к первым двум азимутальным четвертям (т.е. от 0 до 180°). Графики наглядно де-

монстрируют вышеупомянутые особенности решаемых систем уравнений: нелинейность рассматриваемых зависимостей и их стремление, при приближении угла  $\theta$  к 90°, модуля упругости к нулю, а отношения  $\sigma_2/\sigma_1$  к величине  $(C + A)/(C - A) \approx 2$ .

Сопоставительный анализ попарных комбинаций 29 реперных пунктов свидетельствует о том, что в диапазоне

$1 \leq (\sigma_2/\sigma_1) < 5$  с точностью  $\pm 5^\circ$  общие азимуты направления оси  $\sigma_2$  имеются у 48 точек пересечений рассматриваемых функций:  $f$  (азимут  $\sigma_2$ ,  $\sigma_2/\sigma_1$ ) и  $f$  (азимут  $\sigma_2$ ,  $E$ ). В качестве примера на рис. 2, 3

такие пересечения выделены жирными кривыми для пары реперов 05-19 и 4-6 (пересечение на  $34^\circ$ ) и пары 2-6 и 05-1 (пересечение на  $171^\circ$ ). Итоговые результаты сведены в табл. 2.

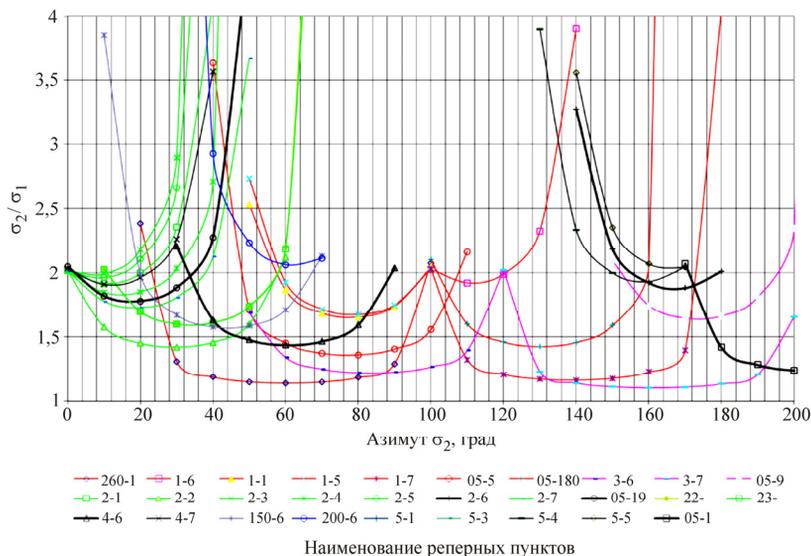


Рис. 2. Графики расчетных значений  $\sigma_2/\sigma_1$ , удовлетворяющих условию  $\sigma_1 > \sigma_2$  для различных азимутов оси  $\sigma_2$

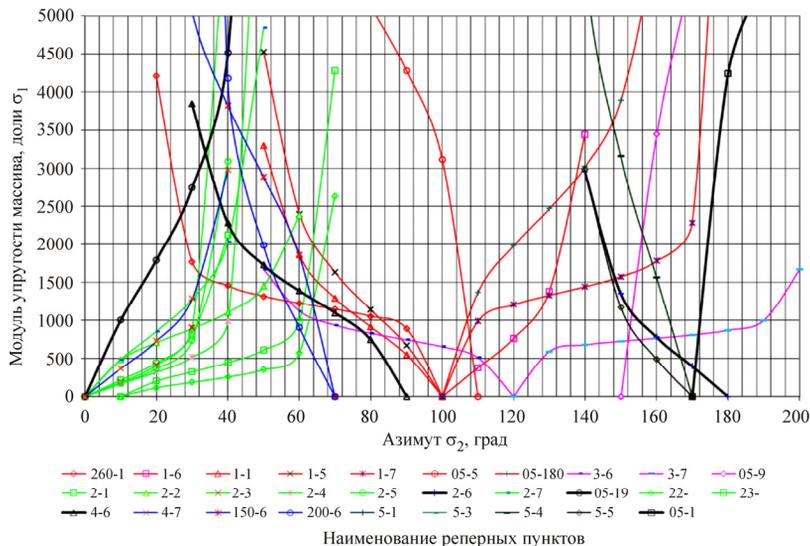


Рис. 3. Графики расчетных значений модуля упругости  $E$ , удовлетворяющих условию  $\sigma_1 > \sigma_2$  для различных азимутов оси  $\sigma_2$

Таблица 2

Результаты оценки НДС и модуля упругости горного массива в окрестностях карьера «Удачный» по векторам сдвижений попарных комбинаций реперных пунктов

№ п/п	Пары пунктов	$\sigma_2/\sigma_1$	Модуль упругости, МПа	Азимут оси $\sigma_2$ , град
1	2	3	4	5
1	200-6 – 23	2,0	1000	60
2	1-1 – 2-2	2,0	2200	58
3	2-6 – 05-1	1,9	400	171
4	05-9 – 2-6	2,1	900	152
5	5-5 – 1-6	3,7	3200	139
6	05-19 – 4-6	2,0	3200	34
7	2-6 – 1-6	3,5	3200	138-139
8	1-5 – 2-2	2,0	2400	59-60
9	200-6 – 05-19	2,5	4500	40-41
10	200-6 – 2-7	2,5	2900	44-45
11	4-6 – 1-1	1,7	800	80-82
12	4-6 – 1-5	1,7	1100	80-82
13	150-6 – 1-1	1,8	1800	60-62
14	05-19 – 260-1	1,8	2400	25-27
15	05-9 – 5-4	1,9	2100	154-156
16	05-5 – 1-6	1,9	400	107-109
17	05-180 – 05-5	1,8	1000	105-107
18	200-6 – 22	2,0	800	59-61
19	4-7 – 200-6	3,4	3600	39-42
20	3-6 – 1-7	1,3	600	106-109
21	1-7 – 05-5	1,7	800	106-109
22	260-1 – 3-6	1,2	700	88-92
23	200-6 – 2-4	2,9	2900	40-44
24	200-6 – 2-1	3,8	3100	38-42
25	1-1 – 23	2,0	1700	58-62
26	2-7 – 4-6	1,9	2200	35-40
27	1-5 – 23	2,0	2000	59-64
28	2-6 – 5-4	1,9	500	160-166
29	200-6 – 2-2	2,0	1600	53-59
30	4-6 – 2-2	1,5	1600	46-52
31	2-3 – 4-6	2,5	3000	27-34
32	1-5 – 22	2,0	1800	59-66
33	1-1 – 22	2,0	1500	58-65
34	3-6 – 4-6	1,5	1600	50-57
35	3-6 – 150-6	1,6	1000	57-64
36	4-6 – 4-7	2,2	2500	30-37
37	2-7 – 260-1	1,8	1500	26-34
38	1-6 – 5-4	3,0	4500	135-143
39	150-6 – 2-2	1,6	2100	50-58
40	3-6 – 05-180	1,6	600	106-113
41	4-6 – 2-1	2,3	2500	29-38
42	4-7 – 260-1	2,0	1500	23-32
43	05-180 – 5-4	1,9	3500	150-160
44	2-3 – 260-1	2,2	1500	22-32
45	2-5 – 4-6	2,4	2500	28-38
46	2-4 – 4-6	2,1	2100	32-42
47	2-5 – 260-1	2,2	1500	24-34
48	2-1 – 260-1	2,0	1500	25-35

Диаграмма, представляющая расчетные отношения  $\sigma_2/\sigma_1$  и ориентировку главных осей первоначальных напряжений массива, полученных по первой методике, приведена на рис. 4, а по второй

методике – на рис. 5. На рис. 5 также представлены значения модуля упругости  $E$ , выявленные для соответствующих участков массива.



Рис. 4. Диаграмма с результатами расчетов соотношения и ориентировки главных осей тензора первоначальных напряжений горного массива в окрестностях карьера «Удачный» для каждого из 29 реперов при  $\sigma_1 = -1$  МПа и модуле упругости массива  $E = 1700$  МПа (столбцы 6 и 7 табл. 1). На горизонтальной оси в азимутальном интервале 0–180° с шагом 10° отложены дирекционные углы направления оси  $\sigma_2$ , а по вертикали – частотность выявления соответствующего направления с расчетными значениями  $\sigma_2/\sigma_1$  и степенью нарушения массива в районе установки того или иного репера



Рис. 5. Диаграмма с результатами расчетов соотношения  $\sigma_2/\sigma_1$ , модуля упругости  $E$  и ориентировки главных осей тензора первоначальных напряжений горного массива в окрестностях карьера «Удачный» для каждой из 48 парных комбинаций реперов (столбцы 3–5 табл. 2). На горизонтальной оси в азимутальном интервале 0–180° с шагом 10° отложены дирекционные углы направления оси  $\sigma_2$ , а по вертикали – частотность выявления соответствующего направления с расчетными значениями  $\sigma_2/\sigma_1$  (представлено в числителе), модулем упругости  $E$  (представлено в знаменателе в долях  $\sigma_1$ ) и степенью нарушения массива (представлено заливкой) в районе установки репера

**Обсуждение результатов и выводы**

Обоими способами получены качественно идентичные результаты (см. рис. 4, 5). Преобладающее соотношение главных напряжений окружающего горного массива  $\sigma_2/\sigma_1$  повсеместно близко к 2, а в распределении расчетных направлений оси максимального сжатия  $\sigma_2$  проявляются две выборки: преобладающая – северо-восточного направления и менее четко выраженная – юго-восточного.

Для анализа независимости переменных по критерию « $\chi$ -квадрат»  $n = 29$  расчетных разностей между азимутом оси  $\sigma_2$  и дирекционным углом, определяемым эллиптической координатой соответствующего реперного пункта, были сопоставлены с ожидаемой частотой их равномерного распределения со средне-

арифметической разностью в  $67^\circ$ . Полученное значение  $\chi^2 = 381$  при  $(n - 1) = 28$  степенях свободы даже для уровня значимости 0,05 % в 6,5 раза превышает табличное  $\chi^2 = 59,3$ . Это свидетельствует о существенной независимости выявленных направлений осей  $\sigma_2$  от неравномерности размещения реперов вокруг карьера.

Для взаимного сопоставления полученных выборок результаты двух способов сведены в табл. 3. Сопоставительный анализ свидетельствует о статистической значимости обеих выборок расчетных азимутов оси  $\sigma_2$ , поскольку среднеквадратическая ошибка расхождения  $S_d$  между совокупностями северо-восточного и юго-восточного направлений составляет: для 1-го способа – 7,6; для 2-го – 7,8.

Таблица 3

Замеренные параметры НДС горного массива рудника «Удачный»

Наименование параметров НДС	Способ определения параметров НДС			
	1-й (по 29 реперам)		2-й (по 48 парам реперов)	
1	2	3	4	5
Направление оси $\sigma_2$	северо-восточное	юго-восточное	северо-восточное	юго-восточное
Объем выборки	$n_{1(1)} = 17$ реперов (59 %)	$n_{2(1)} = 12$ реперов (41 %)	$n_{1(2)} = 32$ пары реперов (67 %)	$n_{2(2)} = 16$ пар реперов (33 %)
<u>Азимут оси <math>\sigma_2</math></u>				
Размах вариации	$50^\circ$ (от $20$ до $70^\circ$ )	$69^\circ$ (от $103$ до $172^\circ$ )	$44^\circ$ (от $22$ до $66^\circ$ )	$91^\circ$ (от $80$ до $171^\circ$ )
Среднеарифметическое значение	$49^\circ$	$144^\circ$	$45^\circ$	$124^\circ$
Среднеквадратическое отклонение	$S_{1(1)} = 15^\circ$	$S_{2(1)} = 23^\circ$	$S_{1(2)} = 13^\circ$	$S_{2(2)} = 30^\circ$
<u>Отношение <math>\sigma_2/\sigma_1</math></u>				
Размах вариации	3,1 (от 1,2 до 4,3)	1,5 (от 1,2 до 2,7)	2,3 (от 1,5 до 3,8)	2,5 (от 1,2 до 3,7)
Среднеарифметическое значение	2,3	2,1	2,1	1,2
Среднеквадратическое отклонение	1,0	0,4	0,5	3,7
<u>Модуль упругости <math>E</math></u> <u>(в долях напряжений <math>\sigma_1</math>)</u>				
Размах вариации	–	–	$3700 \sigma_1$ (от $800 \sigma_1$ до $4500 \sigma_1$ )	$4100 \sigma_1$ (от $400 \sigma_1$ до $4500 \sigma_1$ )
Среднеарифметическое значение	–	–	$2125 \sigma_1$	$1519 \sigma_1$
Среднеквадратическое отклонение	–	–	$810 \sigma_1$	$1331 \sigma_1$

Среднеквадратические ошибки более чем на порядок меньше расхождений между среднearифметическими значениями азимутов, составляющими 80–95°, что не позволяет исключить из рассмотрения выборки юго-восточного направления (несмотря на их большую вариативность) и, таким образом, сделать однозначный вывод о преобладающем направлении наибольшего сжатия  $\sigma_2$  в поле первоначальных напряжений окружающего горного массива.

Проблема была решена путем привлечения расчетных модулей упругости различных участков массива, определенных 2-м способом, и геологических данных об их нарушенности. Диаграмма рис. 5 указывает на приуроченность северо-восточной выборки к участкам со средней и низкой нарушенностью. Наиболее же высокая нарушенность концентрируется в крайнем юго-восточном секторе. Это дало основания для выдвижения рабочей гипотезы, что статистически более слабая и вариативная юго-восточная выборка обусловлена процессами деформирования трещиноватых участков массива как иерархически блочной среды: с хаотичными разнонаправленными подвижками разномасштабных породных блоков и, соответственно, установленных в них реперов.

По критерию нарушенности пород в месте установки того или иного репера вся совокупность 2-го способа из  $n = 48$  расчетных данных была подразделена на  $m = 2$  выборки:

1-я выборка – 20 пар реперов, установленных на участках исключительно с низкой и средней степенью нарушенности (6–10 систем трещин) со среднearифметическим значением модуля упругости  $E = 2345\sigma_1$ ;

2-я выборка – 28 пар реперов на участках, включающих высокую и очень высокую нарушенность (более 10 систем трещин) со средним модулем упругости  $E = 1621\sigma_1$ .

Величина дисперсии между выборками  $S_B^2$  при степени свободы  $(m - 1) = 1$  составляет  $6\,290\,112\sigma_1$ , а внутривыборочная  $S_W^2$  дисперсия со степенями свободы  $(n - m) = 46$  не превышает  $S_W^2 = 972\,101\sigma_1$ . Отношение между дисперсиями  $F = S_B^2/S_W^2 = 6,47$  больше табличного значения критерия Фишера  $F = 4,05$  для уровня значимости 5% (или, иначе говоря, для 95%-ной доверительной вероятности). Это позволяет принять гипотезу о различных источниках формирования междувыборочной дисперсии и, следовательно, рассматривать для цели определения параметров первоначального поля напряжений только результаты, полученные по 20 парам реперов на участках с низкой и средней степенью нарушенности (на рис. 5 выделены жирной линией). По данным реперам расчетные азимуты оси  $\sigma_2$  оказываются сконцентрированы в довольно узком секторе от 31 до 60°, а по оставшимся – более или менее равномерно распределены по сектору от 22 до 171° (см. рис. 5).

Таким образом, в итоге были получены следующие обобщенные параметры НДС горного массива месторождения «Трубка Удачная» АК «АЛРОСА» для 95%-ного доверительного интервала  $\pm\Delta X$ , определяемого из выражения

$$\pm\Delta X = 1,96 \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{где } S - \text{среднеквадратическое отклонение соответствующего параметра; } n - \text{величина выборки, } n = 20):$$

1) соотношение главных осей тензора первоначальных напряжений нетронутого массива

$$\sigma_2/\sigma_1 = 2,2 \pm 0,3 \quad (\text{при } S = 0,6);$$

2) азимут оси  $\sigma_2$

$$45^\circ \pm 4,4^\circ \quad (\text{при } S = 10,1^\circ);$$

3) модуль упругости породного массива

$$E = 2345\sigma_1 \pm 410\sigma_1 \quad (\text{при } S = 931\sigma_1).$$

Предлагаемая методика впервые позволила получить экспериментальные данные о первоначальном напряженно-деформированном состоянии и упругих характеристиках горного массива на максимально больших базах (пространственных – порядка 5–10 км, временных – около 10 лет) и при этом учесть статистическую «разновесность» результатов натурных замеров, обусловленную иерархически блочной структу-

рой деформируемой породной толщи. Следует отметить, что она является дополнением традиционных методов маркшейдерского мониторинга, изложенных в соответствующих нормативных документах и научно-технической литературе [13–15].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-00324-а).*

#### Список литературы

1. Кратч Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. – М.: Недра, 1978. – 494 с.
2. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – М.: Недра, 1989. – 332 с.
3. Geertsma J. A Basic Theory of Subsidence Due to Reservoir Compaction: The Homogeneous Case / Verh. Con. Ned. Geol. Mijnbouw. Gen. – 1973. – Vol. 28. – P. 43–62.
4. Сашурин А.Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии / Ин-т горн. дела УрО РАН. – Екатеринбург, 1999. – 268 с.
5. Сашурин А.Д. Истоки и пути предотвращения природно-техногенных катастроф в сфере недропользования // Геомеханика в горном деле: докл. междунар. конф., 5–8 июня 2005 г. – Екатеринбург, 2005. – С. 242–247.
6. Балек А.Е. Связь модельных представлений о деформировании скальных горных массивов с пространственными и временными масштабами // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф., 14–15 окт. 2009 г. / Ин-т горн. дела УрО РАН. – Екатеринбург, 2009. – С. 3–13.
7. Панжин А.А. Диагностика геомеханического состояния породного массива на различных масштабных уровнях геодезическими методами // Геомеханика в горном деле: докл. междунар. конф., 5–8 июня 2005 г. – Екатеринбург, 2005. – С. 21–28.
8. Rock Mechanics, Theory and Applications with case histories / W. Wittke, R. Sykes, S. Semprich, B. Plischke. – 1st ed. – Springer, Springer-Verlag, 1990. – 1076 p.
9. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Основные уравнения. Плоская теория упругости. Кручение и изгиб. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
10. Деформационные предвестники техногенных землетрясений при разработке месторождений углеводородов / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, В.Г. Букин, С.В. Гришко, С.Л. Одинцов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 40–49.
11. Кашников Ю.А., Мусихин В.В., Лысков И.А. Определение оседаний земной поверхности подработанных территорий при разработке месторождений полезных ископаемых по результатам интерферометрической обработки радарных данных // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 68–77.
12. Инструкция по созданию наблюдательных станций и производству инструментальных наблюдений за процессами сдвижения земной поверхности при разработке нефтяных месторождений в регионе Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей (ВКМКС). – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 34 с.
13. Геомеханическая оценка состояния ответственных сооружений Тишинского рудника при отработке глубоких горизонтов / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, Д.В. Шустов, А.Е. Фандеев, А.И. Ананин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 2. – С. 43–52.
14. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / сост. К.Б. Абельсеитов, А.Г. Акимов, Е.В. Бошнятов, А.С. Ведяшкин, Ю.Н. Гавриленко, М.Н. Жукунов, В.Н. Земисев, В.И. Коваленко, С.К. Магруппов, Н.И. Митичкина, И.А. Петухов, В.П. Самарин, С.Г. Синопальников, Ю.Б. Файнштейн, Л.П. Чепенко, А.С. Ягунов. – М.: Недра, 1989. – 96 с.

15. Инструкция по наблюдениям за движением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 112 с.

### References

1. Kratch G. Sdvizhenie gornyykh porod i zashchita podrabatyvaemykh sooruzhenii [Rock displacement and protection of constructions in the undermined areas]. Moscow: Nedra, 1978. 494 p.
2. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kaspar'ian E.V. Osnovy mekhaniki gornyykh porod [Foundations of rock mechanics]. Moscow: Nedra, 1989. 332 p.
3. Geertsma J. A Basic Theory of Subsidence Due to Reservoir Compaction: The Homogeneous Case. *Verh. Con. Ned. Geol. Mijnbouw. Gen.*, 1973, vol. 28, pp. 43–62.
4. Sashurin A.D. Sdvizhenie gornyykh porod na rudnikakh chernoii metallurgii [Rock displacement in mines of ferrous industry]. Ekaterinburg: Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 1999. 268 p.
5. Sashurin A.D. Istoki i puti predotvrashcheniia prirodno-tekhnogennykh katastrof v sfere nedropol'zovaniia [Background and ways to prevent natural and manmade disasters in subsurface management]. *Doklady mezhdunarodnoi konferentsii "Geomekhanika v gornom dele"*. Ekaterinburg, 2005, pp. 242–247.
6. Balek A.E. Sviaz' model'nykh predstavlenii o deformirovanii skal'nykh gornyykh massivov s prostanstvennymi i vremennymi masshtabami [Connection of model representations of rock massifs with spatial and time scales]. *Doklady mezhdunarodnoi konferentsii "Geomekhanika v gornom dele"*. Ekaterinburg: Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2009, pp. 3–13.
7. Panzhin A.A. Diagnostika geomekhanicheskogo sostoiianiia porodnogo massiva na razlichnykh masshtabnykh urovniakh geodezicheskimi metodami [Diagnostics of geomechanical condition of rock massif at different scales using geodesic methods]. *Doklady mezhdunarodnoi konferentsii "Geomekhanika v gornom dele"*. Ekaterinburg, 2005, pp. 21–28.
8. Wittke W., Sykes R., Semprich S., Plischke B. Rock Mechanics, Theory and Applications with case histories. 1st ed. Springer-Verlag, Springer, 1990. 1076 p.
9. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti. Osnovnye uravneniia. Ploskaia teoriia uprugosti. Kruchenie i izgib [Some basic problems of mathematical theory of elasticity. Basic equations. Plain elasticity theory]. Moscow: Nauka, 1966. 707 p.
10. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G., Bukin V.G., Grishko S.V., Odintsov S.L. Deformatsionnye predvestniki tekhnogennykh zemletriasenii pri razrabotke mestorozhdenii uglevodorodov [Deformation portents of induced earthquakes in developing hydrocarbon deposits]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no. 4, pp. 40–49.
11. Kashnikov Iu.A., Musikhin V.V., Lyskov I.A. Opredelenie osedanii zemnoi poverkhnosti podrabotannykh territorii pri razrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh po rezul'tatam interferometricheskoi obrabotki radarnykh dannykh [Detection of surface subsidence in the undermined areas in developing reserves of mineral resources]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2012, no. 4, pp. 68–77.
12. Instruksiiia po sozdaniiu nabludatel'nykh stantsii i proizvodstvu instrumental'nykh nabludeniia za protsessami sdvizheniia zemnoi poverkhnosti pri razrabotke neftiannykh mestorozhdenii v regione Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievykh soli (VKMKS) [Guidelines for setting observing stations and instrumental monitoring of surface movement in developing oil reserves in the region of Verkhnekamskoe deposit of potassium and magnesium salts]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003. 34 p.
13. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G., Shustov D.V., Fandeev A.E., Ananin A.I. Geomekhanicheskaia otsenka sostoiianiia otvetstvennykh sooruzhenii Tishinskogo rudnika pri otrabotke glubokikh gorizontov [Geomechanical assessment of condition of operational constructions in developing deep horizons in Tishinsky mine]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2010, no. 2, pp. 43–52.
14. Abel'seitov K.B., Akimov A.G., Bosheniatov E.V., Vediashkin A.S., Gavrilenko Iu.N., Zhukenov M.N., Zemisev V.N., Kovalenko V.I., Magrupov S.K., Mitichkina N.I., Petukhov I.A., Samarina V.P., Sinopal'nikov S.G., Fainshtein Iu.B., Chepenko L.P., Iagunov A.S. Instruksiiia po nabludeniiam za sdvizheniem gornyykh porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnoi razrabotke ugol'nykh i slantsevyykh

mestorozhdenii [Guidelines for monitoring rock and surface movement in underground development of coal and shale reserves]. Moscow: Nedra, 1989. 96 p.

15. Instruktsiia po nabludeniiam za sdvizheniem gornykh porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Guidelines for monitoring rock and surface movement in underground development of ore deposits]. Moscow: Nedra, 1988. 112 p.

#### Об авторах

**Сашурин Анатолий Дмитриевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, заведующий отделом геомеханики Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук (620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; e-mail: sashour@igd.uran.ru).

**Балек Александр Евгеньевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук (620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; e-mail: balek@igduran.ru).

#### About the authors

**Anatolii D. Sashurin** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Geomechanics, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620219, Ekaterinburg, Mamina-Sibiriaka st., 58; e-mail: sashour@igd.uran.ru).

**Aleksandr E. Balek** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of Laboratory of Geomechanics of Underground Constructions, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620219, Ekaterinburg, Mamina-Sibiriaka st., 58; e-mail: balek@igduran.ru).

Получено 3.04.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сашурин А.Д., Балек А.Е. Совершенствование методики натурных замеров напряженно-деформированного состояния больших участков горного массива // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 105–120.

Please cite this article in English as:

Sashurin A.D., Balek A.E. Improvement of field measurement of stress-deformed state of the large massif parts. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 11, pp. 105–120.