УДК 622.831.32

Д.В.СИДОРОВ, *канд. техн. наук, доцент, sidorov-post@yandex*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

D.V.SIDOROV, *PhD in eng. sc., associate professor, sidorov-post@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Приведены положения методологии комплексной оценки влияния тектонических нарушений на устойчивость массива горных пород для условий разработки рудных пластовых месторождений сложного геологического строения. Степень устойчивости массива горных пород и конструктивных элементов систем разработки в зонах влияния тектонических нарушений оценивается по величине приращения напряжений от действия подвижек на контактной поверхности тектонического нарушения .

Ключевые слова: методология, тектонические нарушения, зоны проскальзывания, массив горных пород, рудная залежь, напряжения, перемещения, динамическая пригрузка.

METHODOLOGY OF THE COMPLEX ESTIMATION OF INFLUENCE OF TECTONIC DISTURBANCES ON STABILITY OF THE ROCK MASS AT MINING OF ROCK-BUMP HAZARDOUS ORE DEPOSITS DIFFICULT GEOLOGIC STRUCTURE

Positions of methodology of a complex estimation of influence of tectonic disturbances on stability of a rock mass for conditions of mining of ore deposits of a difficult geologic structure are considered. Degree of stability of a rock mass and constructive elements of mining methods in zones of influence of tectonic disturbances is estimated on size of an increment of stresses from action of motions on a contact surface of a tectonic disturbance.

Key words: Methodology, tectonic disturbances, destruction zones, a rock mass, ore deposit, stresses, movings, dynamic pressure.

Проблема повышения эффективности и безопасности отработки тектонически-нарушенных пластовых удароопасных рудных месторождений является актуальной. Это связано с интенсификацией разработки месторождений, увеличением опорных нагрузок на несущие элементы систем разработок, что обуславливает развитие геодинамических процессов и явлений, наиболее опасными из которых являются горные удары различной природы и силы, приводящие к мгновенным разрушениям горных пород и обрушениям выработок. Решением данной проблемы занимались специалисты крупнейших институтов как в России, так и за рубежом. В результате многолетних исследований были разработаны и внедрены на горных предприятиях региональные и локальные методы прогноза и предотвращения горных ударов, в том числе на тектонически-нарушенных участках. Вместе с тем, как показывают современные исследования, применение этих мер полностью не решило проблему предотвращения геодинамиче-

ских явлений. Необходимо совершенствование методологии комплексной оценки влияния тектонических нарушений на устойчивость массива горных пород и конструктивные элементы систем разработок с учетом широкого диапазона следующих параметров: расположение и направление развития очистных работ в крыльях тектонических нарушений, размеры выработанных пространств, амплитуда и азимут простирания тектонических нарушений, сцепление и углы внутреннего трения пород; размеры зон разрушений на контактной поверхности тектонических нарушений, присутствие различных литологических разностей горных пород в крыльях тектонических нарушений и невыдержанная мощность полезного ископаемого как по падению, так и по простиранию.

Применяемые в настоящее время методы исследований (анализ взаимодействия тектонических структур, лабораторное моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива, натурные наблюдения и шахтные эксперименты) влияния тектонических структур на устойчивость массива горных пород при использовании различных разрозненных данных, характеризующих изменение состояния массива с учетом влияния тектонических нарушений, не дают возможности получить комплексную оценку. Результаты, получаемые при применении упомянутых методов, носят в основном качественный характер и не дают комплексной количественной оценки влияния широкого диапазона факторов.

Постановка широкомасштабных инструментальных исследований является трудоемкой и дорогостоящей. Поэтому в настоящее время при оценке поведения массива горных пород отдают предпочтение методам физического моделирования и расчетным методам.

Среди методов физического моделирования наибольшую известность получил метод эквивалентных материалов. На его основе обнаружен ряд закономерностей и продемонстрирован процесс деформирования пород у очистной и подготовительной выработки. Метод не утратил своей актуальности, но область его применения уменьшилась вследствие использования более мобильных и оперативных расчетных методов.

До массового применения компьютеров расчетные методы лишь конкурировали с методами физического моделирования. Объясняется это тем, что в основе расчетных методов лежит механика сплошной среды, базирующаяся на законах теории упругости и пластичности. Реализация подобного рода задач требует решения сложных уравнений, зачастую не имеющих аналитического решения даже для довольно упрощенных схем, что не позволяло в полной мере реализовывать методы теории упругости и пластичности и создать рабочий аппарат для горных инженеров.

Главное допущение в теории упругости и пластичности состоит в том, что материал тела представляет собой сплошную среду. Эта строгая физическая формулировка свойства среды многими специалистами-горняками истолковывалась весьма узко: среда сплошная, а массив горных пород нарушен выработками, имеет пустоты, трещины и т.д., значит, теория не подходит. На самом деле понятие «сплошная среда» относится к структуре материала, подчеркивая его аморфность в неком малом по объему элементе тела, что не запрещает учет указанных особенностей массива горных пород.

Интенсивное развитие вычислительной техники обусловило широкое использование во многих прикладных задачах горной геомеханики таких основных методов, как метод конечных элементов (МКЭ) и граничных интегральных уравнений (МГИУ) для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород (МГП), а также моделирования динамических задач. Это касается как плоских задач, так и (в последние годы), пространственных задач о расчете напряжений и деформаций вокруг выработок, пройденных в массиве горных пород. При этом наиболее эффективным стало применение численных методов для решения дифференциальных уравнений. Однако применение численного метода конечных элементов в трехмерных задачах является весьма трудоемким, особенно с точки зрения разбивки пространства на конечные элементы, их сопряжения, подготовки исходной и анализа полученной информации.

Таким образом, на сегодняшний день перспективным видится применение современных компьютерных технологий, позволяющих использовать математическое моделирование для описания процессов, происходящих при разработке месторождений, в части оценки напряженно-деформированного состояния и степени удароопасности разрабатываемых участков шахтных полей в зонах влияния тектонических нарушений, направленное на учет широкого диапазона горно-геологических и горно-технических условий ведения горных работ и базирующееся на пространственном математическом моделировании геомеханических процессов.

Предлагаемая методология базируется на комплексном использовании метода граничных интегральных уравнений, метода расчета напряжений в МГП, метода предельного равновесия для плоскости сместителя тектонического нарушения (ТН) и метода расчета напряжений в МГП от действия силы, приложенной в некоторой бесконечной точке. Методологическая схема приведена на рис.1.

База исходных данных объектов включает следующий комплекс параметров:

• параметры объектов, принадлежащих выработанному пространству (очистные камеры, выработки различного назначения и т.д.): геометрические размеры (ширина, длина и высота) и расположение в 3D пространстве, физико-механические свойства пород кровли;

• параметры объектов, являющихся несущими, опорными конструкциями (рудная залежь, междукамерные и барьерные целики, участки непромышленного оруденения, породный массив): геометрические размеры (ширина, длина и мощность) и расположение в 3D пространстве, физико-механические свойства руды или породы;

• параметры тектонических нарушений (вид, тип, элементы залегания, угол внутреннего трения и сцепления пород шва нарушения);

• параметры профилактических мероприятий, ориентированных на разгрузку рудо-породного массива от опасных концентраций горного давления за счет бурения скважин большого диаметра;

• граничные условия из нагрузок, снимаемых с почвы очистных выработок. Значения нагрузок, приходящихся на почву очистных выработок, непосредственно зависят от взаимодействия кровли и почвы рудной залежи. Учет влияния этого взаимодействия осуществляется введением параметра сдвижения.

Пояснительная схема к применению методологии на примере ведения горных работ камерно-столбовой системой разработки в зоне влияния тектонического нарушения приведена на рис.2.

Оценка напряженно-деформированного состояния рудной залежи по методу граничных интегральных уравнений. Метод граничных интегральных уравнений Фредгольма второго рода с достаточной степенью точности может применяться для оценки напряженного состояния в конструктивных элементах, принадлежащих рудной залежи в области участков № 1, 2 (рис.2). Решается в два этапа пространственная упругопластическая задача. На первом этапе расчет ведется в упругом режиме. После проверки расчетных элементов на устойчивость и выявления разрушенных элементов или элементов, перешедших в область пластических деформаций, производится корректировка базы исходных данных в части замены в соответствующих рудных элементах модулей упругости на модули пластичности. Затем повторно реализуется процесс расчета напряжений по методу граничных интегральных уравнений в упругопластической постановке [2].

Оценка напряженно-деформированного состояния на поверхности сместителя тектонического нарушения может быть выполнена с применением методов оценки величин компонент тензора напряжений в упругом массиве горных пород, в области МГП (рис.2), а также в элементах, принадлежащих плоскости тектонических нарушений, через величины вертикальных напряжений $\sigma_z(\xi, \eta)$, получаемых из упругопластической реализации по МГИУ. Оценка компонент тензора напряжений на наклонных площадках осуществляется при помощи направляющих косинусов, таким образом давая возможность оценивать напряженно-деформированное состояние в точках плоскости тектонического нарушения с различными элементами залегания.

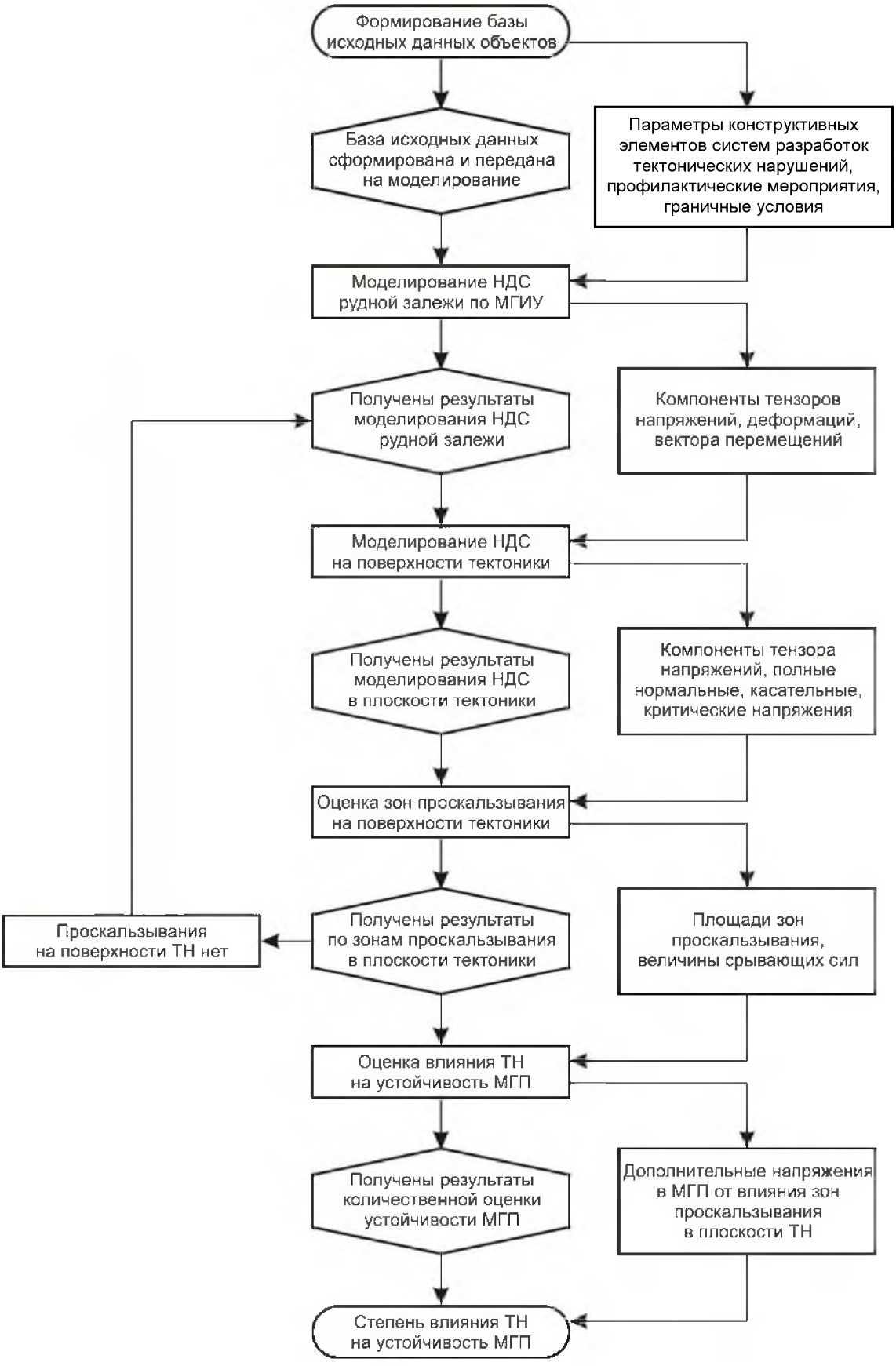


Рис.1. Основная методологическая схема

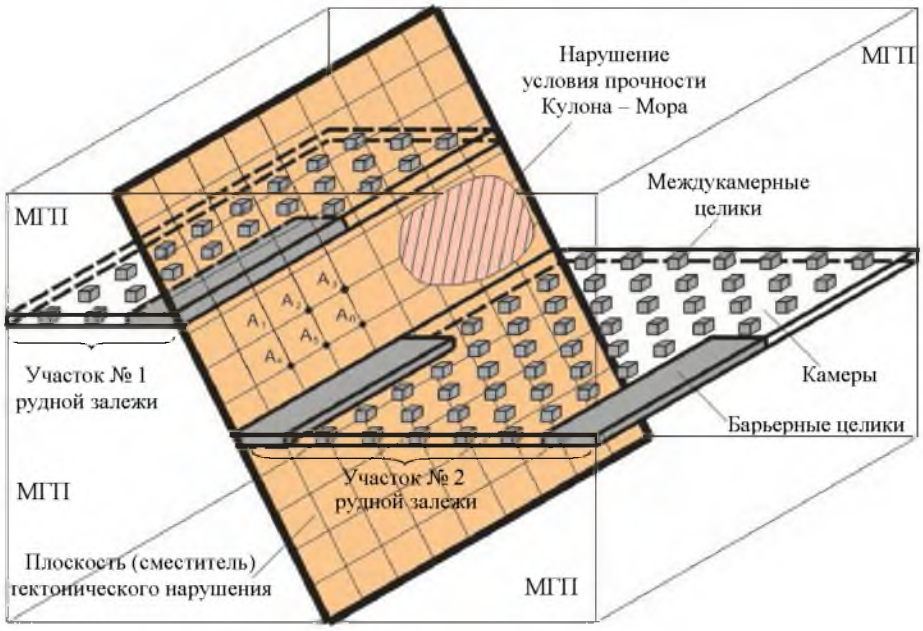


Рис.2. Пояснительная схема к применению методологии

Оценка зон проскальзывания на контактной поверхности тектонических нарушений. Для прогнозирования срыва сцепления в точках тектонического нарушения [1] определяются величины нормальных напряжений σ_ν, величины касательных напряжений τ_ν, действующих на наклонных площадках элементов, принадлежащих плоскости сместителя тектонического нарушения.

В качестве критерия оценки устойчивости элементов тектонических нарушений принято условие прочности Кулона – Мора. Если условие прочности нарушается, т.е. выполняется неравенство

$$\tau_{\nu,i} > \tau_{\nu.\text{кр}.i} = C_i + \sigma_\nu \text{tg}(\rho_i),$$

где C_i – сцепление пород в элементе тектонического нарушения, МПа; ρ_i – угол внутреннего трения пород в элементе тектонического нарушения, град., то в элементах площадью $S_{\text{подв}.i}$ имеет место проскальзывание (срыв сцепления) по контактной поверхности сместителя нарушения. Данные элементы классифицируются как элементы с проскальзыванием. Размеры зон проскальзывания на контактной поверхности сместителя тектонического нарушения определяются количеством дискретных элементов, в которых нарушено условие прочности Кулона – Мора.

Количественная оценка степени влияния тектонических нарушений на устойчивость массива горных пород. Для выполнения количественной оценки степени влияния тектонических нарушений на устойчивость массива горных пород (в том числе целики различного назначения, краевую часть рудной залежи, породы кровли выработок) от действия подвижек на контактной поверхности нарушения может быть с достаточной степенью точности принят метод Кельвина [3], базирующийся на расчете напряжений в МГП от действия сил, приложенных в элементах тектонических нарушений с подвижками и определяемых по формуле [3],

$$\sigma_{\text{доп}}^{\text{тн}} = \left[-B(1-2\nu_\text{п})z(r^2+z^2)^{-\frac{3}{2}} + \right.$$
$$\left. + 3z^3(r^2+z^2)^{-\frac{5}{2}} \right], \qquad (1)$$

где B – параметр, характеризующий напряжение, вызываемое срывающей силой в элементах тектонического нарушения с подвижками, МПа; $\nu_\text{п}$ – коэффициент Пуассона пород; r и z – горизонтальное и вертикальное расстояние от элемента с подвижкой на плоскости сместителя тектонического нарушения до интересующей точки МГП, м,

$$B = 100\frac{(\tau_{\text{v.кр}.i} - \tau_{\text{v},i})S_{\text{подв},i}}{8\pi(1-\nu_{\text{п}})}. \qquad (2)$$

Величины дополнительных перемещений в элементах рудной залежи от влияния подвижек на контактной поверхности тектонических нарушений определяются из следующего выражения:

$$W_{\text{тн}} = \left(\frac{1}{1-K_{\text{и}}}\right)W_{\text{тн.фон}}, \qquad (3)$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент извлечения руды из смежных с целиком очистных камер, $K_{\text{и}} = (S_{\text{в}} - S_{\text{ц}}) / S_{\text{в}}$, с учетом площади смежных с целиком выработок $S_{\text{в}}$ и площади целика $S_{\text{ц}}$; $W_{\text{тн.фон}}$ – фоновые перемещения, возникающие в элементах в плоскости рудной залежи в результате разрушения на плоскости сместителя ТН, МПа.

Фоновые перемещения, возникающие в рудо-породных элементах (целиках) в плоскости отработки рудной залежи в результате разрушения на плоскости сместителя ТН, могут быть найдены из следующего выражения (А.И.Лурье, 1955):

$$4\pi G W_{\text{тн.фон}} = S_x\left(\frac{x_{\text{тн}}z_{\text{тн}}}{R_{\text{тн}}^3} + \frac{m-2}{m}\times \right.$$
$$\left. \times\frac{x_{\text{тн}}}{R_{\text{тн}}(R_{\text{тн}}+z_{\text{тн}})}\right) +$$
$$+ S_y\left(\frac{y_{\text{тн}}z_{\text{тн}}}{R_{\text{тн}}^3} + \frac{m-2}{m}\frac{y_{\text{тн}}}{R_{\text{тн}}(R_{\text{тн}}+z_{\text{тн}})}\right) +$$
$$+ S_z\left(\frac{2(m-1)}{m}\frac{1}{R_{\text{тн}}} + \frac{z_{\text{тн}}^2}{R_{\text{тн}}^3}\right), \qquad (4)$$

где G – модуль сдвига, МПа, $G = E_{\text{п}}/(2(1 + \nu_{\text{п}}))$; $E_{\text{п.экв}}$ – модуль упругости вмещающих пород, МПа; $\nu_{\text{п}}$ – коэффициент Пуассона; $S_x = 0{,}01k_x\tau_{\text{кр.тн}}S_{\text{эл.тн}}$; $S_y = 0{,}01k_y\tau_{\text{кр.тн}}S_{\text{эл.тн}}$; $S_z = 0{,}01k_z\tau_{\text{кр.тн}}S_{\text{эл.тн}}$ – проекции на оси координат критической силы S, при воздействии которой происходит разрушение на плоскости сместителя ТН в точках с координатами $x_{\text{тн}}$, $y_{\text{тн}}$, $z_{\text{тн}}$, т; $\tau_{\text{кр.тн}}$ – величина критического напряжения, при котором происходит разрушение на плоскости сместителя ТН, МПа; $S_{\text{эл.тн}}$ – площадь элемента (области) подвижки на плоскости тектонического нарушения, м^2; $R_{\text{тн}}$ – расстояние между точками, расположенными на плоскости сместителя ТН и центрами элементов, расположенными в плоскости отработки рудной залежи, м; $R_{\text{тн}} = \sqrt{(x_{\text{тн}} - x_{\text{эл}})^2 + (y_{\text{тн}} - y_{\text{эл}})^2 + (z_{\text{тн}} - z_{\text{эл}})^2}$; $m = 1/\nu_{\text{п}}$.

С учетом рассмотренных методологических положений, степень влияния тектонического нарушения на устойчивость массива горных пород определяется величиной приращения напряжений (величиной динамической пригрузки), получаемой из выражения (1).

Автор выражает искреннюю благодарность директору Института маркшейдерского дела и геодезии Фрайбергской горной академии профессору А.Сроке и немецким коллегам за обсуждение вопросов оценки влияния тектонических нарушений на устойчивость массива горных пород.

Настоящие исследования выполнены по гранту № А/10/74888, присужденному Германской службой академических обменов (DAAD) и Министерством образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Безухов Н.И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М., 1966.

2. *Сидоров Д.В.* К расчету напряжений в несущих элементах камерно-столбовой системы разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 3.

3. *Тимошенко С.П.* Теория упругости / С.П.Тимошенко, Дж.Гудьер. М., 1975.

REFERENCES

1. *Bezuhov N.I.* Bases of the theory of elasticity, plasticity and creep. M, 1966.

2. *Sidorov D.V.* To calculation of stresses in bearing elements of chamber-and-pillar mining method // The mountain information-analytical bulletin. 1999.

3. *Timoshenko S.P., Guder J.* The elasticity theory. Moscow, 1975.