

**Н.В. Черданцев****ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА  
ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ  
И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ**

В основе разработанной модели геомеханического состояния массива, вмещающим выработку и геологическое нарушение, лежат два метода – метод фиктивных нагрузок и метод разрывных смещений. Метод фиктивных нагрузок описывает граничные условия на контуре выработки, а метод разрывных смещений формулирует условия на берегах нарушения. Геологическое нарушение представляет собой узкую шель с заполнителем из упругого материала с заданными характеристиками жесткости на сжатие и сдвиг. В рамках модели проведены исследования напряженного состояния массива в окрестности выработки и шели, в частности, построены эпюры нормальных напряжений в кровле выработки и почве шели. Результаты проведенных исследований показывают, что при определенных расстояниях между ними в массиве возникают значительные растягивающие напряжения. Эти напряжения и в кровле выработки, и в почве шели действуют в горизонтальном направлении. Размеры зон нарушения сплошности массива, возникающих вокруг одиночной выработки, незначительно отличаются от размеров аналогичных зон, образующихся в массиве в окрестности выработки и шели. Максимальное отличие значений коэффициента нарушенности массива для этих случаев составляет порядка 7 процентов. *Ключевые слова:* массив горных пород, поверхности ослабления, горная выработка, прочностная анизотропия, геологическое нарушение, зоны нарушения сплошности.

**И**звестно, что угольное месторождение является массивом осадочных горных пород, структура которого представлена совокупностью пластов (слоев) различной мощности, налегающих друг на друга. Каждый пласт составлен породами, достаточно однородными по своим физико-химическим и механическим свойствам.

При тектонических движениях в земной коре на некоторых участках массива возникают напряжения, превышающие предельные значения напряжений его пород. В этой связи в нем появляются различного рода аномалии, которые сводятся к следующим трем типам: дизъюнктивное нарушение, «слабые» («перемятые») породные слои (или отдельные их части), кливаж.

Под дизъюнктивным (разрывным) нарушением понимают результат действия тектонических сил, при котором горные породы разорваны по некоторой поверхности на блоки и смещены относительно друг друга [1].

«Слабые» («перемятые») породные слои – слои массива горных пород с низкими характеристиками прочности, обусловленными тектоническими процессами на ранних стадиях его формирования [1].

Кливаж – система регулярных трещин, образующихся в пластах при их деформировании тектоническими силами. Кливаж и слоистость образуют поверхности ослабления, по которым характеристики прочности массива значительно ниже, чем по другим его направлениям. Разрушение по поверхностям ослабления массива приводит к образованию зон нарушения сплошности (ЗНС) [2].

Наибольшую опасность для породного массива в окрестности горных выработок представляют дизъюнктивные нарушения.

Задача о геомеханическом состоянии массива около выработки и дизъюнктивного нарушения уже обсуждалась в работе [3], где это нарушение аппроксимировано узким прямоугольным отверстием, а граничные условия на его контуре приняты в соответствии с законом сухого трения Кулона. Поле напряжений в окрестности выработки и математической щели построено на основе решения методом механических квадратур интегрального уравнения второй внешней краевой задачи теории упругости относительно фиктивной нагрузки, которая приложена к контуру выработки изнутри для обеспечения выполнения граничных условий.

В отличие от описанного подхода, в этой статье реальный контакт крыльев геологического нарушения представляет собой узкую прямолинейную щель с заполнителем, деформирующимся упруго [4]. Отрезок контакта моделирован разрывом смещений, а поверхности разрыва считаются связанными пружиной, в силу чего, деформирование каждого элемента контура щели описывается одномерными соотношениями сжатия и сдвига. Величины разрывов смещений элементов контура щели, могут быть определены методом разрывных смещений, в котором неизвестными величинами являются разрывы смещений. Сам метод основан на решении задачи, описывающей связь напряжений и разрывов смещений на противоположных сторонах отрезка длиной, расположенного в бесконечной плоскости и нагруженного противоположно направленными нормальными и касательными силами [5].

В статье представлены результаты решения задачи о геомеханическом состоянии массива, вмещающем выработку прямоугольного поперечного сечения с размерами  $b$ ,  $h$  и геологическое нарушение размером  $b_n$ , которое для простоты названо щелью. Принято, что трасса выработки и направление щели параллельны, в силу чего, породы в их окрестности находятся в условиях плоской деформации. Массив нагружен гравитационным давлением  $\gamma H$  ( $\gamma$  – средневзвешенный объемный вес налегающих пород,  $H$  – глубина заложения выработки), а по бокам – давлением  $\lambda\gamma H$  ( $\lambda$  – коэффициент бокового давления) (рис. 1).

При решении задачи начало системы координат  $Oyz$  расположено в центре тяжести выработки. Координаты центра тяжести щели в этой системе задано координатами  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  и углом  $\alpha_n$ , представляющим собой угол между осью  $z$  и

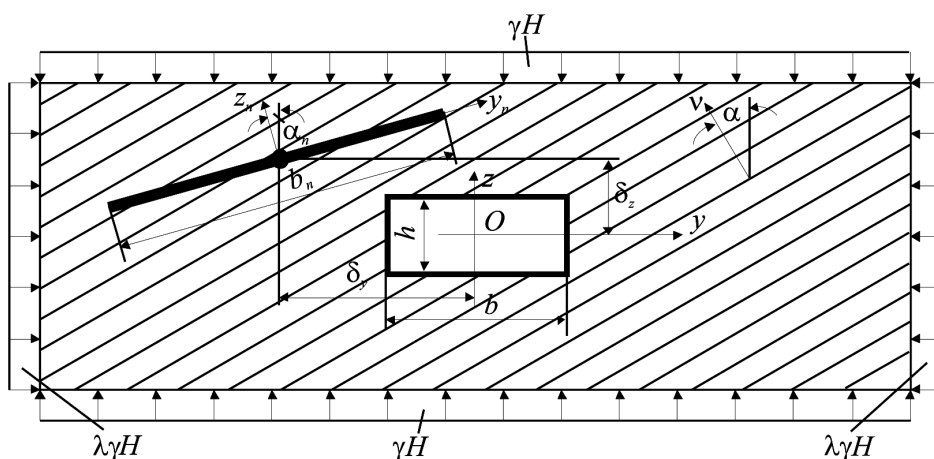


Рис. 1. Расчетная схема массива с выработкой и щелью

нормалью к ее контуру. Положение поверхности ослабления в пространстве определено нормалью к ней  $\nu$ , которая образует с осью  $z$  угол падения  $\alpha$ , а проекция нормали  $\nu$  на горизонтальную плоскость  $xu$  составляет с осью  $u$  угол простираения  $\beta$ .

В качестве показателей, по которым оценивается состояние массива, принимаются поле напряжений, его зоны нарушения сплошности и коэффициент нарушенности  $k_n$ , который определяется как отношение площади ЗНС на площадь поперечного сечения выработки [3].

В связи с тем, что граничные условия на контурах одиночных выработки и щели описываются по-разному, система граничных уравнений состоит из нескольких блоков. Они включают уравнения метода фиктивных нагрузок для граничных условий на контуре выработки, уравнений метода разрывных смещений, описывающих условия на контуре щели, а также уравнения, учитывающие взаимные влияния фиктивных нагрузок выработки и разрывов смещений щели.

Следовательно, разрешающая система граничных уравнений состоит из  $2N_b$  уравнений относительно неизвестных координат вектора фиктивной нагрузки  $a_y, a_z$  в точках на поверхности выработки и  $2N_n$  уравнений относительно неизвестных координат вектора разрыва смещений  $D_y$  и  $D_z$  на контуре щели. В этих уравнениях  $N_b$  – число граничных элементов, аппроксимирующих поверхность выработки, а  $N_n$  – число граничных элементов, заменяющих контур щели.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{1}{2} a_{y,i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_b} (\Phi_{yy,ij} a_{y,j} + \Phi_{yz,ij} a_{z,j}) \Delta L_{b,i} + \\
 + \sum_{j=1}^{N_n} (\Omega_{yy,ij} D_{y,j} + \Omega_{yz,ij} D_{z,j}) \Delta L_{b,i} = \lambda \gamma H \Delta L_{b,i} n_{yb,i} \\
 \frac{1}{2} a_{z,i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_b} (\Phi_{zy,ij} a_{y,j} + \Phi_{zz,ij} a_{z,j}) \Delta L_{b,i} + \\
 + \sum_{j=1}^{N_n} (\Omega_{zy,ij} D_{y,j} + \Omega_{zz,ij} D_{z,j}) \Delta L_{b,i} = \gamma H \Delta L_{b,i} n_{zb,i} \\
 \sum_{j=1}^{N_b} (\Phi 1_{yy,ij} a_{y,j} + \Phi 1_{yz,ij} a_{z,j}) \Delta L_{b,i} + \\
 + K_s D_{y,i} \Delta L_{b,i} + \sum_{j=1}^{N_n} \Psi_{ij} D_{y,j} \Delta L_{b,i} = \frac{(1-\lambda) \gamma H}{2} \Delta L_{b,i} \sin 2\alpha_n \\
 \sum_{j=1}^{N_b} (\Phi 1_{zy,ij} a_{y,j} + \Phi 1_{zz,ij} a_{z,j}) \Delta L_{b,i} + \\
 + K_n D_{z,i} \Delta L_{b,i} + \sum_{j=1}^{N_n} \Psi_{ij} D_{z,j} \Delta L_{b,i} = \left( \frac{1+\lambda}{2} + \frac{1-\lambda}{2} \cos 2\alpha_n \right) \gamma H \Delta L_{b,i}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

В уравнениях (1)  $i, j$  – номера граничных элементов.  $\Delta L_{b,i}$  – размер  $i$ -го граничного элемента выработки,  $n_{yb}, n_{zb}$  – направляющие косинусы нормали к точкам контура выработки,  $K_s, K_n$  – сдвиговая и нормальная жесткости заполнителя щели.  $\Phi_{yy}, \Phi_{yz}, \Phi_{zy}, \Phi_{zz}$  – матрицы влияния фиктивной нагрузки на контуре выработки.  $\Phi 1_{yy}, \Phi 1_{yz}, \Phi 1_{zy}, \Phi 1_{zz}$  – матрицы влияния фиктивной нагрузки на

контуре щели;  $\Omega_{yy}, \Omega_{yz}, \Omega_{zy}, \Omega_{zz}$  – матрицы влияния разрывов смещений на контуре выработки;  $\Psi_{yy}, \Psi_{yz}, \Psi_{zy}, \Psi_{zz}$  – матрицы влияния разрывов смещений на контуре щели. Матрицы  $\Phi_{yy} \dots \Phi_{zz}$  определяются по формулам [6], а матрицы  $\Omega_{yy} \dots \Psi_{zz}$  по формулам [4].

Решения системы (1) находится методом механических квадратур [7], а поле напряжений в произвольной точке  $k$  расчетной области определяется на основе принципа суперпозиции путем суммирования напряжений от действия фиктивной нагрузки, разрывов смещений и напряжений естественного поля.

Система уравнений получена для случая, когда до проведения выработки шель деформирована и на ее контуре возникают дополнительные напряжения. Чаще всего в деформированном состоянии оказываются шель дизъюнктивного нарушения. Если до проведения выработки шель не деформирована, то дополнительных напряжений нет и, следовательно, на ее контуре напряжения равны напряжениям нетронутого массива. В этом случае правые части двух последних уравнений системы (1) равны нулю. Недеформированному состоянию щели соответствуют состояние «слабого» слоя породы, прочность и жесткость которого существенно ниже характеристик окружающих его пород. Что касается поверхностей ослабления, то при определении поля напряжений они не учитываются [2].

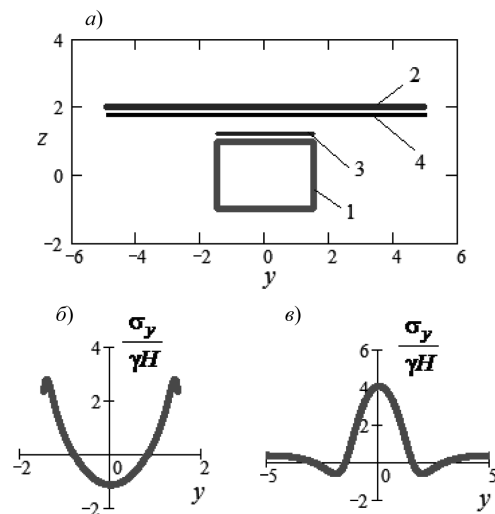
Ниже представлены некоторые результаты проведенного вычислительного эксперимента, построенного на основе представленной модели. За исходные данные приняты следующие параметры массива, выработки и щели. До проведения выработки шель находится в недеформированном состоянии:

$$H = 400 \text{ м}, b = 3 \text{ м}, h = 2 \text{ м}, b_n = 10 \text{ м}, \lambda = 0,7, \gamma = 25 \text{ кН/м}^3.$$

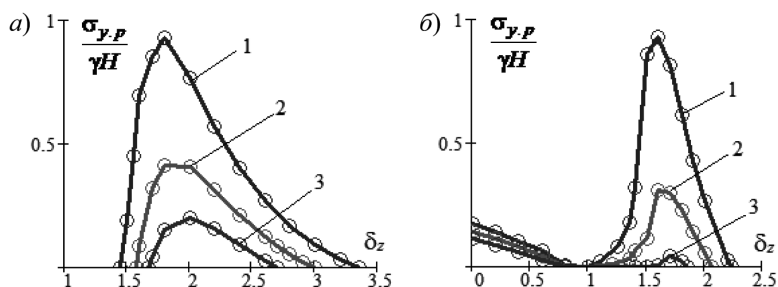
Другие параметры среды в ходе исследований менялись.

В ходе проведенных исследований оказалось, что в окрестности выработки и щели появляются горизонтальные растягивающие напряжения. Поскольку горные породы значительно хуже сопротивляются растяжению, чем сжатию, то появление трещин разрыва весьма вероятно. В этой связи в статье представлены результаты расчета только горизонтальных нормальных напряжений  $\sigma_y$ .

На рис. 2 эпюры нормальных напряжений  $\sigma_y$  построены вдоль линий 3, 4 проведенных в кровле выработки 1 и в почве щели 2, координаты центра которой  $\delta_y = 0, \delta_z = 2 \text{ м}$  (рис. 2, а). Коэффициенты нормальной и сдвиговой жесткости заполнителя приняты следующими:  $K_n = 100 \text{ МПа/м}, K_s = 0,4K_n = 40 \text{ МПа/м}$ . На рис. 2, б эпюра напряжений в кровле выработки, а на рис. 2, в она построена вдоль почвы щели. На эпюрах сжимающие нормальные напряжения считаются положительными.



**Рис. 2. Эпюры горизонтальных напряжений в кровле выработки и почве щели**



**Рис. 3. Графики зависимости растягивающих напряжений в кровле выработки (а) и почве щели (б) от расстояния между их горизонтальными осями**

Из анализа эпюр следует, что в центральной части кровли напряжения  $\sigma_y$  растягивающие и достигают величины  $\gamma H$ . В центральной части почвы щели они, наоборот сжимающие, и достигают значительной величины, равной  $4 \gamma H$ . В местах почвы щели, расположенных над углами выработки, напряжения  $\sigma_y$  снова растягивающие.

Таким образом, в породах, расположенных между выработкой и щелью, растягивающие напряжения появляются в центральной части кровли выработки и частях почвы щели, расположенных над углами выработки. Их появление обусловлено величинами нормальной и сдвиговой жесткостей заполнителя щели.

В этой связи для ряда значений жесткости  $K_n$  проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 3. Так, на рис. 3, а построены графики зависимости горизонтальных растягивающих напряжений  $\sigma_{y.p}$  в кровле выработки от расстояния между выработкой и щелью  $\delta_z$ , а на рис. 3, б графики построены для растягивающих напряжений в почве щели. На этих рисунках графики 1 соответствуют  $K_n = 100$  МПа/м, графики 2 –  $K_n = 500$  МПа/м, 3 –  $K_n = 1000$  МПа/м. Сдвиговая жесткость  $K_s$  во всех случаях составляла значение  $0,4 K_n$ .

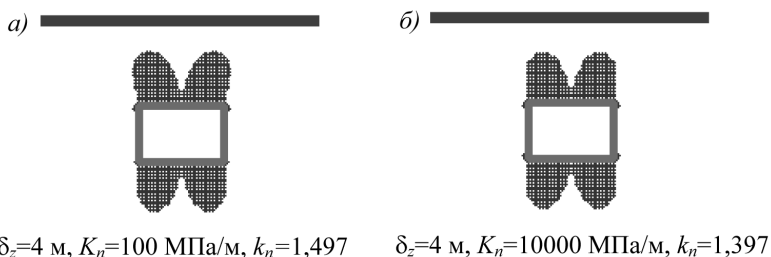
Из рисунков следует, что максимумы растягивающих напряжений в кровле выработки на всем диапазоне жесткостей приходятся на отрезок  $\delta_z$  [1,8 м; 2 м]. В почве щели эти напряжения достигают максимума при  $\delta_z = 1,6$  м. Следует отметить, что растягивающие напряжения в кровле выработки возникают только, когда щель находится над выработкой, а в почве щели они появляются и при пересечении ее выработкой.

Кроме появления растягивающих напряжений в массиве с прочностной анизотропией может произойти разрушение по поверхностям ослабления согласно критерию прочности Мора-Кузнецова [7]

$$|\tau_v| \geq \sigma_v \operatorname{tg} \varphi + K \quad (2)$$

где  $\tau_v$  и  $\sigma_v$  – касательное и нормальное напряжения, действующие по поверхности ослабления;  $\varphi$  и  $K$  – угол внутреннего трения и коэффициент сцепления по ней. Совокупность точек массива, в которых выполняется условие (2) образуют зоны нарушения сплошности.

Ниже представлены результаты исследований прочности массива по поверхностям ослабления, которые заключались в построении ЗНС массива вокруг выработки и щели, установлении их размеров и определении границ влияния на них щели. Как и прежде принято, что  $K_s = 0,4 K_n$ . Угол внутреннего трения и коэффициент сцепления принимают следующие значения  $\varphi = 20^\circ$ ,  $K = 0$ . Поверхности ослабления приняты горизонтальными ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ).



**Рис. 4. Зоны нарушения сплошности массива для двух вариантов коэффициента жесткости заполнителя щели**

На рис. 4, а и 4, б представлены картины зон нарушения сплошности массива, построенных для разных значений жесткости заполнителя. Из рисунка видно, что размеры и конфигурация ЗНС для двух значений коэффициента жесткости незначительно отличаются друг от друга для этих двух вариантов, что говорит о малом влиянии параметров жесткости заполнителя. Отклонение максимального коэффициента нарушенности массива около выработки и щели малым коэффициентом жесткости заполнителя от коэффициента нарушенности массива с одиночной выработкой составляет порядка 7%.

В заключении следует отметить, что представленная модель вполне применима и к оценке состояния массива, в котором щель образована путем направленного гидро-разрыва с целью перераспределения напряжений в зоне ведения очистных работ [8]. По результатам вычислительного эксперимента и их анализа могут быть установлены наиболее оптимальные параметры щели.

### **Выводы**

1. Разработанная модель геомеханического состояния массива горных пород с прочностной анизотропией, вмещающая выработку и тектоническое нарушение, построена на основе методов фиктивных нагрузок и разрывных смещений, описывающих граничные условия задачи. Учет в модели свойств заполнителя нарушения расширяет возможности модели в оценке и анализе состояния анизотропного массива.

2. Расположенное в непосредственной близости от выработки нарушение оказывает существенное влияние на распределение напряжений в окружающем массиве. На определенных его участках она вызывает горизонтальные растягивающие напряжения, которые приводят к появлению вертикальных трещин разрыва, представляющих опасность при ведении горных работ.

3. Влияние нарушения на размеры зон нарушения сплошности массива около выработки незначительно. Так, значение коэффициента нарушенности массива в окрестности одиночной выработки лишь на 7% меньше аналогичного значения коэффициента нарушенности массива около выработки и рядом расположенного нарушения с низкой жесткостью ее заполнителя.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Букринский В.А. Геометрия недр. – М.: Недра, 1999. – 526 с.
2. Ержанов Ж.С., Изаксон В.Ю., Станкус В.М. Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости. – Кемерово: Кемеров. книжн. изд-во, 1976. – 216 с.

3. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Геомеханическое состояние массива горных пород, вмещающего выработку и дизъюнктивное нарушение // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 6. – С. 3–12.

4. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.

5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

6. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.

7. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. – М.: Наука, 1981. – 688 с.

8. Клишин В.И., Леконцев Ю.М., Голубев В.М., Попов С.В. Экспериментальные исследования разупрочнения основной кровли методом направленного гидроразрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 10. – С. 98–100. **ПЛАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

---

Черданцев Николай Васильевич – доктор технических наук, доцент, зав. лабораторией, e-mail: nvch2014@yandex.ru, Институт угля СО РАН.

---

UDC 622.241.54

## **GEOMECHANICAL CONDITIONS OF SURROUNDING ROCKS AROUND EXCAVATION AND GEOLOGICAL DISLOCATION**

Cherdantsev N.V., Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Laboratory, e-mail: nvch2014@yandex.ru, Institute of Coal of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 650065, Kemerovo, Russia.

---

*In the basis of the developed models of geomechanical state massif, contain of mine working and geological violation, are two methods – the method of fictitious loads and displacement discontinuity method. The method of fictitious loads describes the boundary conditions on the contour generation, and the displacement discontinuity method formulates the conditions on the banks of the violation. Geological violation is a narrow gap with a filler of resilient material with desired characteristics of stiffness in compression and shear. Within the model the conducted research of the stress state of rock mass around mine working and crevices, in particular, the diagrams of the normal stresses in the roof of the mine working and the soil cracks. The results of these studies show that with certain distances between them in the array experience significant tensile stresses. These stresses in the roof of a drift, and in soil cracks are acting in the horizontal direction. The sizes of the zones of discontinuity in the array that occur around a single mine working, differ slightly from the sizes of similar zones formed in an array around an excavation and cracks. The maximum difference of values of the coefficient of dislocation for these cases is about 7 percent.*

*Key words. The massif of rocks, weakening surfaces, mine working, strength anisotropy, geo-logical disturbance, the zone of discontinuity.*

## **REFERENCES**

1. Bukrinskiy V.A. *Geometriya nedr* (Subsoil geometry), Moscow, Nedra, 1999, 526 p.
2. Erzhanov Zh.S., Izakson V.Yu., Stankus V.M. *Kombaynovye vyrabotki shakht Kuzbassa. Opyt podderzhaniya i raschet ustoychivosti* (Shearer-driven excavations in underground mines in Kuzbass. Experience of support and stability calculation), Kemerovo, Kemerov. knizhn. izd-vo, 1976, 216 p.
3. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. *Vestnik KuzGTU*. 2014, no 6, pp. 3–12.
4. Krauch S., Starfild A. *Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela* (Boundary element methods in solid mechanics), Moscow, Mir, 1987, 328 p.
5. Timoshchenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* (Theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1979, 560 p.
6. Lur'e A.I. *Teoriya uprugosti* (Theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1970, 940 p.
7. Parton V.Z., Perlin P.I. *Metody matematicheskoy teorii uprugosti* (Methods of mathematical theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1981, 688 p.
8. Klishin V.I., Lekontsev Yu.M., Golubev V.M., Popov S.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no 10, pp. 98–100.