

6. **Самойлович И.С.** Защита от перенапряжений мобильных электроустановок карьеров. - М.: Недра, 1980. - 160 с.
7. **Самойлович И.С.** Защита от перенапряжений электроустановок открытых горных работ. - М.: Недра, 1992. - 128 с.
8. **Самойлович И.С.** К оценке переходных сопротивлений при однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ // Проблемы технической электродинамики. - 1972. - вып.37. - С. 55-60.
9. **Щуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н.** Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 152 с.
10. **Дергилев М.П., Обабков В.К.** К вопросу о перенапряжениях в сетях 6-10 кВ горных предприятий // Промышленная энергетика. - 1992. - №6. - С. 46-48.
11. **Дударев Л.Е., Волошек И.В.** Особенности дуговых замыканий на землю в сетях с нейтралью, заземленной через резистор // Электричество. - 1993. - №8. - С. 26-31.
12. **Халилов Ф.Х.** Анализ характера внутренних перенапряжений в сетях 35 кВ // Промышленная энергетика. - 1972. - №11. - С.38-40.
13. **Барановская М.Л., Тытюк В.К.** Математическое моделирование переходных процессов при ОЗЗ в распределительных сетях 6-35 кВ // ДВНЗ «Криворізький національний університет», Гірничий вісник. – Кривий Ріг. - 2014. - № 98 – С.174-178.
14. **Барановская М.Л., Кузьменко А.С.** Анализ математических моделей распределительных сетей при ОЗЗ // ДВНЗ «Криворізький національний університет», Гірничий вісник. – Кривий Ріг. - 2015. - № 99. - С. -133-139.
15. **М. Baranovskaya, Tytyuk V., Nevzlin B., Zagirnyak V.** Branched circuit of 6 kV operation with insulated neutral under phase-to-earth fault // Електромеханічні і енергозберігаючі системи Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. - Кременчук, 2015. - № 1(29). - С. 67-73.
16. Distribution - class arresters offers strength, durability. - Transmiss. and Distrib., 1984. - №7. - P.60.
17. **Niebuhr W.D.** Metal - oxide - varistor surge arrestors : Technology and application concepts. CIREN, 1983; 7th Int. Conf. Elec. Distrib., Liege, 25-29 Apr., 1983. Pt 1. Liege, 1983. - P. 13/1 - 13/6.
18. **Walsh Gorge W.A.** review of lightning protection and grounding practices. - TEEE Trans. Ind. Appl., 1979. -P. 133-138.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.17

УДК 622.271.33

А.В. БОЛОТНИКОВ, канд. техн. наук, член.-корр. Академии горных наук Украины
Коллективное предприятие «Академический дом»
А.А. РОМАНЕНКО, начальник службы движения,
ЧАО «Центральный горнообогатительный комбинат»

АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Цель. Целью данной работы является анализ литературных источников на предмет имеющихся мировых практик оценки устойчивости бортов карьеров и естественных откосов. Рассмотрение теории предельного равновесия сыпучей среды и вариантов ее применения при определении предельной или за предельной степени устойчивости массива горных пород. Понятие коэффициента запаса устойчивости и коэффициента надежности откоса.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применен комплексный метод исследований, который включал: анализ научной литературы по рассматриваемым вопросам, систематизацию и классификацию исходной информации. Факторный анализ расчетных методов, оценка учета факторов при определении коэффициента запаса устойчивости, коэффициента надежности массива горных пород. Методы математического анализа, Методы механики грунтов и твердого деформируемого тела для аналитического описания процессов разрушения горных пород.

Научная новизна. Решение поставленной задачи позволяет на основании систематизации и классификации математических и графоаналитических методов оценки устойчивости бортов карьеров в виде коэффициента запаса устойчивости или коэффициента надежности, выявить факторы имеющие достаточную степень влияния (вес) на устойчивость откосов, однако слабо учитываемые в использующихся в настоящий момент методах.

Практическое значение. Железорудная и металлургическая отрасли являются одними из ведущих в промышленности Украины. В связи с этим развитие открытой добычи полезных ископаемых карьерами с одновременным обеспечением безопасных и экономически эффективных, обеспечивающих оптимальный режим горных работ, углов наклона бортов является одной из наиболее важных научно-практических задач в области открытой разработки полезных ископаемых. Особенно актуальны данные вопросы в регионе Криворожского железорудного бассейна.

Результаты. В настоящий момент разработано более 100 методов расчета запаса устойчивости породных откосов, обзор и анализ наиболее известных из них показывает, что большинство методов базируется на теории Кулона-Мора и в качестве исходных данных при расчетах используют прочностные характеристики горных пород такие как сцепление и угол внутреннего трения.

Существующие методы определения прочностных свойств горных пород не позволяют учесть при расчетах устойчивости комплекс природных и техногенных факторов, влияющих на устойчивость бортов карьеров, таких как трещиноватость массива, подработка подземными горными работами, воздействие массовых взрывов и кривизна бортов в плане. Наиболее целесообразно для повышения надежности оценки устойчивости бортов карьеров использовать теорию районирования для учета природных и техногенных факторов.

Ключевые слова. Устойчивость бортов карьера. Коэффициент запаса устойчивости. Борт карьера. Коэффициент надежности. Метод алгебраического сложения сил. Метод Феллениус/Петтерсона, Метод Спенсера.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Добыча железорудного сырья – одна из наиболее прибыльных отраслей промышленности, на которой удерживается экономика Украины. В связи с этим успешное развитие карьеров и их углубка является одной из наиболее важных задач, которые стоят перед производственниками и учеными, задействованными в проектировании, обеспечении безопасности и эксплуатации объектов, ведущих открытую добычу полезных ископаемых. Особенно актуальны данные вопросы в регионе Криворожского железорудного бассейна, поскольку в данном регионе расположены одни из наиболее глубоких карьеров мира, фактические глубины которых уже на данном этапе разработки составляют в среднем 400-450 м, а проектные 600 и более.

Отработка глубоких карьеров подразумевает возрастание рисков, связанных с устойчивостью бортов, по мере их углубки. В связи с этим возникает проблема определения оптимальных параметров бортов, для обеспечения непрерывной, безопасной и экономически обоснованной отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Анализ исследований и публикаций. К первому методу расчета устойчивости откосов можно отнести метод расчета по плоской поверхности скольжения предложенный в 1820г. Г. Франсе [1, 2, 5, 6]. В 1857 году, Ренкин рассмотрел предельное равновесие бесконечного массива, ограниченного наклонной плоскостью, ввел понятие о поверхности скольжения и вывел, на его основе условия прочности Кулона, основные уравнения теории давления земельных масс.

Дальнейшее развитие теория предельного равновесия и основы методов расчета устойчивости породных откосов нашли свое отражение в работах Ф. Кеттера, Ресаля, Фронтарда, Л. Прандаля, Т. Кармана, А. Како, В.В. Соколовского. [2, 3, 6, 7, 10]

Постановка задачи. Систематизация и анализ отечественных и мировых практики расчета устойчивости бортов карьеров, позволит выполнить анализ достоинств и недостатков, выбрать направление дальнейших исследований.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим наиболее известные инженерные методы расчета устойчивости породных откосов, которые нашли свое применение в теории и практике.

При определении теоретического значения коэффициента запаса устойчивости породных откосов, в отечественной практике реально используются две группы методов:

методы алгебраического суммирования сил по криволинейной (круглоцилиндрической) поверхности сдвижения;

различные модификации метода многоугольника сил.

Рассмотрим эти две группы методов подробнее.

Метод алгебраического суммирования сил по круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Данный метод разработан Г.Л. Фисенко. [2, 4, 8, 12, 13, 14] Согласно теоретических основ метода, массив, ограниченный поверхностью откоса и круглоцилиндрической поверхностью сдвижения (призма возможного сдвижения), разбивается на вертикальные блоки, для каждого из которых находятся удерживающие и сдвигающие силы, которые впоследствии суммируются для всех блоков по поверхности сдвижения, отношение суммы удерживающих сил к сдвигающим определяет коэффициент запаса устойчивости.

Расчеты производятся для нескольких возможных поверхностей сдвижения. Поверхность сдвижения, по которой значение коэффициент запаса устойчивости будет иметь минимальное значение считается наиболее опасной поверхностью сдвижения, а минимальное значение коэффициента запаса устойчивости принимается как значение запаса устойчивости рассматриваемого откоса.

Выбор конкретной расчетной схемы зависит от принятой формы вероятной поверхности сдвижения (круглоцилиндрическая, эллиптическая, спиральная и т.д.), метода суммирования поверхностных и объемных сил, которые действуют по вероятной поверхности сдвижения, формы поверхности породных откосов (выпуклая, вогнутая, прямолинейная).

Математический аппарат, применяемый в этой группе методов, относительно легко формализуется, что позволило создать многочисленные пакеты прикладных программ для определения величины коэффициента запаса устойчивости.

Для построения поверхности скольжения институтом ВНИМИ разработаны ряд правил, которые формализованы в виде выражений. [2, 5, 12, 14]

Широкое применение метода проф. Г.Л.Фисенко для расчетов устойчивости уступов, бортов карьеров и отвалов обусловлено его относительной простотой и достоверностью получаемых результатов.

Вместе с тем методы этой группы не лишены и ряда существенных недостатков, основным из которых является трудности учета в данной расчетной схеме реальной структуры, блочности, систем трещиноватости и поверхностей ослабления, которые существуют в реальных скальных и полускальных породных массивах.

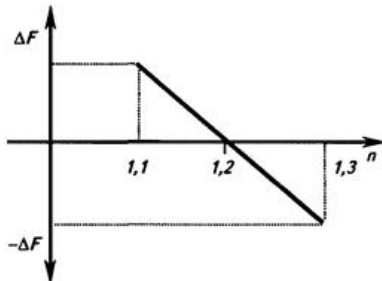
Метод многоугольника сил. Наиболее универсальным для оценки устойчивости бортов и откосов в реальных горно-геологических условиях является метод многоугольника сил, учитывающий реакции между блоками, на которые по определенным признакам разбивается призма возможного обрушения [2, 3, 8, 12].

При расчете методом многоугольника сил точность расчета зависит от расположения границ между смежными блоками и от направления реакции между ними. Достаточная точность расчетов достигается, когда границы между блоками принимают подобно расположению второго семейства поверхностей скольжения при расчете методом предельно напряженного состояния, т.е. под углом $(90^\circ - \varphi)$ к первому семейству поверхностей скольжения.

Для откоса, находящегося в предельном устойчивом состоянии с заданным коэффициентом запаса, многоугольник сил, построенный по наиболее напряженной поверхности скольжения для всей призмы возможного обрушения, должен замыкаться. Это означает, что его устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса, близким к введенному в прочностные характеристики пород.

Если при расчете многоугольник сил не замыкается, т.е. существует невязка сил ΔF , то устойчивость откоса не соответствует принятому коэффициенту запаса. Для определения коэффициента запаса устойчивости откоса в этом случае необходимо повторить расчет по наиболее напряженной поверхности скольжения при других значениях коэффициентов запаса, введенных в прочностные характеристики. Это позволит построить график зависимости невязок ΔF от коэффициентов запаса n (рис. 1) и получить искомый коэффициент запаса.

Рис. 1. График зависимости $\Delta F = f(n)$



В зарубежной практике так же, как и в отечественной основные используемые на практике методы оценки устойчивости откосов можно разделить на методы расчета по круглоцилиндрической поверхности скольжения, например, методы Феллениус/Петтерсона, Бишопа, и методы расчета по многоугольной (полигональной) поверхности скольжения, такие методы как – метод Спенсера, ITF. [1, 9, 10, 11]

Рассмотрим кратко наиболее известные из зарубежных методов расчетов устойчивости откосов.

Методы группы круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Обобщив основные принципы и допущения, использующиеся в методах рассматриваемой группы отмечается, что все методы допускают, что массив грунта над поверхностью скольжения делится на блоки (разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны). Силы, действующие на отдельные блоки, представлены на рис. 2.

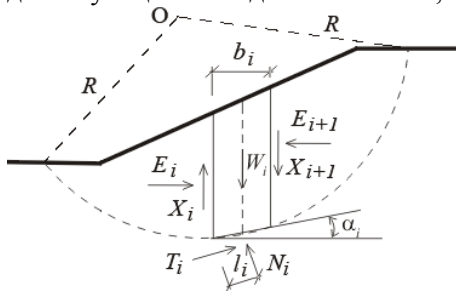


Рис. 2. Типовая схема к расчетам устойчивости методами круглоцилиндрической поверхности скольжения E_i , X_i - нормальная и касательная силы между отдельными блоками. N_i , T_i - нормальная и касательная силы на отдельных сегментах поверхности скольжения. W_i - вес отдельных блоков

В методе Феллениус/Петтерсона допускается только общее уравнение момента равновесия, записанное в отношении к центру поверхности скольжения. Нормальная и касательная силы между блоками X_i и E_i не учитываются. Коэффициент надежности FS рассчитывается напрямую из выражения[9]

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i [c_i \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \cdot \tan \varphi_i] \quad (1)$$

где, u_i - пластовое давление в блоке, c_i , φ_i - прочностные характеристики пород, W_i вес блока, N_i - нормальная сила на сегменте поверхности скольжения, α_i - угол наклона сегмента поверхности скольжения, l_i - длина сегмента поверхности скольжения.

Метод Бишопа также не учитывает X_i силы между блоками. Метод основывается на удовлетворении уравнения момента равновесия и уравнения вертикальной силы уравнения.

Коэффициент надежности FS определяется через [10]

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{FS_{req}}} \quad (2)$$

где, u_i - пластовое давление в блоке, c_i , φ_i - прочностные характеристики пород, W_i - вес блока, α_i - угол наклона сегмента поверхности скольжения, b_i - длина сегмента поверхности скольжения.

Методы расчета по многоугольной (полигооанальной) поверхности скольжения.

Одним из наиболее известных методов данной группы является метод Спенсера. Рассматриваемый метод является общим методом, разработанным на основе предельного равновесия. Он требует удовлетворения равновесия сил и моментов, действующих на отдельные блоки. Блоки создаются путем деления участка грунта над потенциальной поверхностью скольжения плоскостями [11]. Силы, действующие на отдельные блоки, представлены на рис. 3.

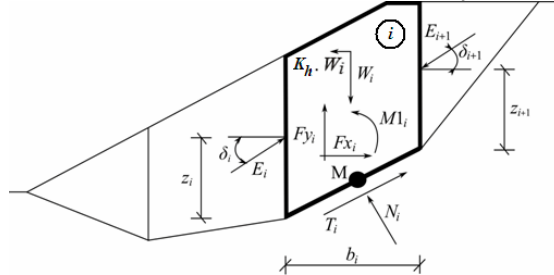


Рис. 3. схема к расчету устойчивости по методу Спенсера

Предполагается, что каждый блок испытывает следующие усилия: W_i - вес блока, в т.ч. воздействие коэффициента сейсмичности; $K_h \cdot W_i$ - горизонтальная инерционная сила, представляющая действие сейсмике, K_h - коэффициент горизонтального ускорения во времени; N_i - нормальная сила на поверхности скольжения; T_i - касательная сила на поверхности скольжения; E_i, E_{i+1} - силы, приложенные соседними блоками, они наклонены от горизонтальной поверхности на угол δ ; F_{x_i}, F_{y_i} - другие горизонтальные и вертикальные силы, действующие на блок; M_{l_i} - момент сил F_{x_i}, F_{y_i} , вращающихся вокруг точки M , которая является центром i -ого сегмента поверхности скольжения; U_i - равнодействующая пластового давления на i -ом сегменте поверхности скольжения.

Для расчета предельного равновесия сил и моментов на отдельных блоках по методу Спенсера используются следующие допущения:

- разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны;
- линия действия веса блока W_i проходит через центр i -ого сегмента поверхности скольжения, представленного точкой M ;
- стандартная сила N_i действует в центре i -ого сегмента поверхности скольжения, в точке M ;
- наклонение сил E_i , действующих между блоками, является постоянной величиной для всех блоков и равно δ , только на крайних точках поверхности скольжения $\delta = 0$;

Решение принимает вид следующих выражений

$$N_i = N'_i + U_i \quad (3)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \cdot \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (4)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + k_h W_i \sin \alpha_i + F_{y_i} \cos \alpha_i - F_{x_i} \sin \alpha_i + \sum_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (5)$$

$$N'_i \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \sin \alpha_i - k_h W_i \cos \alpha_i + F_{y_i} \sin \alpha_i + F_{x_i} \cos \alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (6)$$

$$E_{i+1} \cos \delta_{i+1} \left(z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos \delta_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} + M_1 - k_n W_i (y_M - y_{gi}) = 0 \quad (7)$$

Уравнение (3) представляет отношение между действительным и общим значением нормальной силы, действующей на поверхность скольжения. Уравнение (4) соответствует условию Мора-Кулона, представляющего отношение между нормальной и касательной силами на данном сегменте поверхности скольжения. Уравнение (5) представляет уравнение равновесия силы в направлении под прямым углом к i -му сегменту поверхности скольжению. Уравнение (6) представляет силу равновесия вдоль i -го сегмента поверхности скольжения. FS - коэффициент надежности, который используется для приведения параметров прочностных свойств пород. Уравнение (7) соответствует уравнению момента равновесия вокруг точки M , где y_{gi} - вертикальная координата точки приложения веса блока, а y_M - вертикальная координата точки M .

Изменяя уравнения (5) и (6), получаем рекурсивную формулу.

На основе отношения можно для δ и FS постепенно вычислить все силы E_i между блоками, исходя при этом из факта, что в начале поверхности скольжения значение E известно: $E_1 = 0$.

Из уравнения момента равновесия выводится дополнительная рекурсивная формула [11]

$$z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} \left[E_{i+1} (\sin \delta_{i+1} - \cos \delta \cdot \tan \alpha_i) + E_i \cdot (\sin \delta_i - \cos \delta_i \cdot \tan \alpha_i) + E_i \cdot z_i \cdot \cos \delta_i - M_i + K_n W_i (y_M - y_{gi}) \right]}{E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1}} \quad (8)$$

Эта формула позволяет рассчитать для данных значений δ все плечи z сил, действующих между блоками, зная значение слева в начале поверхности скольжения, где $z_1 = 0$.

Коэффициент надежности SF определяется при помощи следующего итерационного процесса [11]:

Начальное значение δ устанавливается равным 0, $\delta = 0$.

Коэффициент надежности FS для данного значения δ следует из уравнения (1), при этом допускается значение $E_{n+1} = 0$ в конце поверхности скольжения.

Значение δ рассчитывается уравнением (9) с помощью значений E , определенных на предыдущем этапе при условии, что момент на последнем блоке равен 0. Уравнение (9) не определяет значение z_{n+1} , поскольку оно равно 0. Для этого значения должно выполняться уравнение момента равновесия (7).

Этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока значение δ не измениться.

В общем можно сказать, что методы расчета по многоугольной (полигональной) поверхности скольжения более сложные и труднее подвергаются конвергенции чем более простые методы (Феллиниус/Петтерсона, Бишопа). Проблемы с конвергенцией возникают, например, на участках поверхности скольжения повышенной крутизны, сложной геометрии, при резком увеличении пригрузки и т.п.

Выводы и направления дальнейших исследований. Анализ литературных источников показывает, что базовой теорией в области оценки устойчивости бортов карьеров является теория предельного равновесия, базирующаяся на представлении о прочности горных пород.

В настоящий момент разработано более 100 методов расчета запаса устойчивости породных откосов, обзор и анализ наиболее известных из них показывает, что большинство методов базируется на теории Кулона-Мора и в качестве исходных данных при расчетах используют прочностные характеристики горных пород такие как сцепление и угол внутреннего трения. В современной практике на Украине в качестве нормативных методов расчета рекомендованы метод алгебраического сложения сил и многоугольника сил.

Существующие методы определения прочностных свойств горных пород не позволяют учесть при расчетах устойчивости комплекс природных и техногенных факторов, влияющих на устойчивость бортов карьеров, таких как трещиноватость массива, подработка подземными горными работами, воздействие массовых взрывов и кривизна бортов в плане.

Наиболее целесообразно для повышения надежности оценки устойчивости бортов карьеров использовать теорию районирования для учета природных и техногенных факторов.

Список литературы

1. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы // под. редакцией академика **Е.М. Сергеева** // М. «Недра» - 1986 г.
2. **Фисенко Г.Л.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов. - М.: Недра, 1965.-375 с.
3. **Гальперин А.М.** Геомеханика открытых горных работ. – М.: Издательство МГГУ, 2003. – 473с
4. **Несмашный Е.А.** Оптимизация параметров открытых горных выработок. – Кривой Рог: Минерал, 1999. - 118 с.
5. **Галустьян Э.Л.** Геомеханика открытых горных работ. –М: Недра, 1992. -272 с.
6. **Попов И.И., Шпаков П.С., Поклад Г.Г.** Устойчивость породных отвалов. Алма-Ата: Наука КазССР, 1987. 224 с.
7. **Хуан Я. Х.** устойчивость земляных откосов / Пер. с англ. В.С. Забавина; Под ред. **В.Г. Мельника**. – М.: Стройиздат, 1988. – 240 с.
8. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. // Под ред. проф. **Г.Л. Фисенко** // - Л.: ВНИМИ, 1972. - 166 с.
9. **Petterson KE** (1955) The early history of circular sliding surfaces. Geotechnique 5:275-296.
10. **Bishop, A.W.** (1955) "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", Geotechnique, Great Britain, Vol. 5, No. 1, Mar., pp. 7-17
11. **Spencer, E.** 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. Géotechnique, 17(1): 11-26
12. Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів, укосів уступів і відвалів залізрудних та флюсових кар'єрів // Під ред. проф. **А.Г. Шапаря** // -К: - 2009. – 201 с.
13. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. // Под ред. проф. **Г.Л. Фисенко** // – Л.: ВНИМИ, 1971.- 187с.
14. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. // Под ред. проф. **Г.Л. Фисенко** // Л.: ВНИМИ, 1987- 118 с
15. **Казикаев Д.М.** Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд. – М.:Недра, 1981.- С. 288.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.17