УДК 622.271.75:622:882

С.Н. Корнилов, И.Т. Мельников, И.А. Пыталев, Е.В. Павлова, А.И. Суров

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Приведена методика расчета оптимальных параметров горнотехнических сооружений, учитывающая площадь и форму их основания в плане, а также степени обводненности приоткосного массива. Приведены формулы для определения объема отвала в общем случае, для земельного отвода многоугольной формы. Для фигур неправильной формы коэффициенты приближенно рассчитываются как для эллиптической формы, с большой и малой полуосями. При проектировании накопительных горнотехнических сооружений возможно определить неограниченное количество их конфигураций, различающихся формой в плане и по высоте. Обязательным при этом является обеспечение нормативного коэффициента запаса устойчивости. Выполненный анализ по разработанной методике показал, что наибольшая емкость намывных горнотехнических сооружений на заданной площади земельного отвода достигается при круглой, квадратной или близкой к ним формах; при увеличении площади земельного отвода оптимальный угол внешнего откоса уменьшается, а высота сооружения возрастает; вместимость земельного отвода зависит от его формы.

Ключевые слова: параметр, отвал, высота, емкость, откос, отход.

В XXI на каждого жителя планеты ежегодно приходится более 45 т добываемого из недр Земли различных полезных ископаемых, которые преобразуются в продукты потребления с использованием 800 т свежей воды, 2,5 кВт мощности и отторжения 2 м^2 поверхности земли. Только 2% от добываемой горной массы используется человечеством, а остальное складируется во внешних отвалах, терриконах, хвостохранилищах, золо- и шлакоотвалах, в накопителях отходов химической промышленности и других техногенных хранилищах [1].

В настоящее время в России накоплено более 80 млрд т отходов добычи, обогащения и переработки сырья горнометаллургической отрасли, которые образуют техногенные залежи. Ежегодный прирост отходов черной и цветной металлургии составляет соответственно 630 и 374 млн т, что влечет за собой ежегодное увеличение площади отчуждаемых земельных территорий под отходы горнометаллургического комплекса от 85 до 90 км^2 [2].

Возможные варианты конфигурации хвостохранилищ и внешних отвалов вскрыши (накопительные горнотехнические сооружения) определяется многообразием геотехнических факторов: физико-механическими свойствами пород отвала и основания, формой и площадью земельного отвода, рельефом местности, воздействием сейсмических и гидродинамических сил. В связи с вышеизложенным, разработка методики определения параметров накопительных горнотехнических сооружений (ГтС), обеспечивающей максимальную вместимость подотвальных площадей при учете многообразных факторов, является актуальной задачей.

Определение оптимальных параметров накопительных горнотехнических сооружений является задачей многопараметрической оптимизации. В качестве критерия оптимальности следует принимать их максимальную вместимость при заданной площади и форме земельного отвода или минимальную площадь для размещения заданного объема вскрышных пород или отходов обогащения. Методика определения параметров горнотехнических сооружений реализуется в следующей последовательности.

В общем случае объем отвала определяется по зависимости вида:

$$V_0 = H_0 S_0 - \Delta V_{отк},$$

или

$$V_0 = H_0 \cdot S_0 - 0{,}1667 \cdot H_0^2 \cdot \mathrm{ctg}(\alpha) \cdot (3 \cdot P_0 - K_Ф \cdot H_0 \cdot \mathrm{ctg}(\alpha)), \quad (1)$$

где $\Delta V_{отк}$ – потери объема в приоткосной части, м^3; S_0 – площадь основания, м^2; H_0 – высота отвала, м; α – угол откоса отвала, град; P_0 – периметр основания подотвальной площади, м; $K_Ф$ – коэффициент формы подотвальной площади.

В общем случае $K_Ф$ определяется по формулам (2–3):

$$K_Ф = (P_0 - P_В) \cdot (H_0 \mathrm{ctg}(\alpha))^{-1}, \quad (2)$$

где $P_В$ – периметр верхней площадки накопительного горнотехнического сооружения, м.

Для земельного отвода многоугольной формы коэффициент определяется по формуле

$$K_Ф = 2 \cdot N \cdot \mathrm{tg}(\pi \cdot N^{-1}), \quad (3)$$

где N – количество сторон многоугольника основания.

Для фигур неправильной формы коэффициенты приближенно рассчитываются как для эллиптической формы, с большой и малой полуосями. Наиболее распространенные варианты форм основания и аналитическое выражение для

Таблица 1

Значения коэффициентов формы подотвальной площади $K_ф$ и основания отвала K_o

№ п/п	Форма подотвальной площади	Методика определения коэффициентов формы подотвальной площади $K_ф$ и основания отвала K_o
1	Круглая	$K_Ф = 2\pi$; $K_0 = 2\pi^{1/2}$
2	Эллиптическая a, b – полуоси; $K = b / a$	$K_Ф = 2\pi \cdot \{0{,}5 + [0{,}5 - (a - b) \cdot (a + b)^{-2}]^{1/2}\}$; $K_0 = \pi^{1/2} \cdot (K + 1) \cdot K^{1/2}$
3	Квадратная	$K_Ф = 8$; $K_0 = 4$
4	Прямоугольная a, b – стороны; $K = b / a$	$K_Ф = 8$; $K_0 = 2 \cdot (K + 1) \cdot K^{-1/2}$
5	Трапецеидальная a, b – основания; h – высота	$K_Ф = 8$; $K_0 = \langle a + b + 2h \cdot \cos\{\mathrm{arctg}[0{,}5 \cdot h^{-1} \cdot (b - a)]\}\rangle \cdot (h \mp (b - a)/2)^{-1/2}$
6	Треугольная. a, b, c – стороны; P – полупериметр треугольника	$K_Ф = 10{,}39$; $K_0 = (a + b + c) \cdot [(P - a) \cdot (P - b) \cdot (P - c) \cdot P]^{-1/2}$
7	Неправильный многоугольник N – количество сторон основания	$K_Ф = 2 \cdot N \cdot \mathrm{tg}(\pi \cdot N^{-1})$; K_0 – определяется путем инструментальных замеров площади и периметра земельного отвода в плане
Примечание: наибольшее значение $K_Ф$ имеет треугольник – 10,39; наименьшее – круг $2\pi = 6{,}28$.		

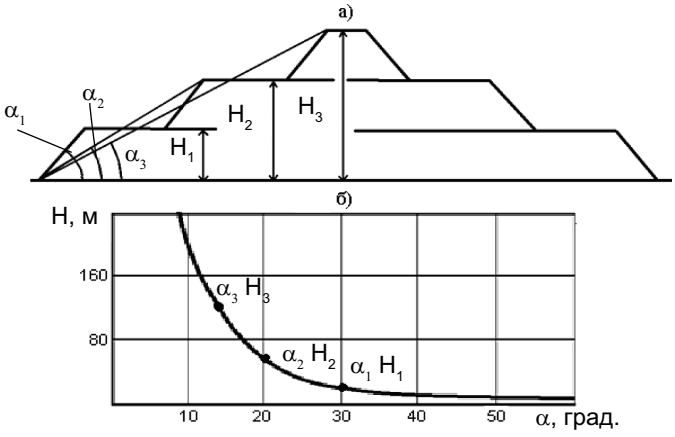

Рис. 1. График зависимости устойчивых параметров горнотехнического сооружения на прочном основании при различных его конфигурациях

определения $K_Ф$ представлены в табл. 1.

При проектировании накопительных горнотехнических сооружений возможно определить неограниченное количество их конфигураций, различающихся формой в плане и по высоте. Обязательным при этом является обеспечение нормативного коэффициента запаса устойчивости (рис. 1, *а*).

Высота отвала H_0 в выражении (1) является функцией физико-механических свойств основания и тела отвала, и, кроме того, зависит от результирующего угла откоса. В работе [3] предложена методика построения зависимости высоты отвала H_0 от результирующего угла откоса (рис. 1, *б*) при безусловном обеспечении нормативного коэффициента запаса устойчивости ($K_у$). Однако эта зависимость имеет дискретный характер, что затрудняет аналитическое исследование функции (1).

Для расчета оптимальных параметров накопительных горнотехнических сооружений целесообразно представить зависимость высоты отвала H_0 от результирующего угла откоса в формализованном виде. Для этого полученный график $H_0 = f(\mathrm{ctg}\,\alpha)$ следует аппроксимировать функцией вида

$$H_0 = m \cdot \mathrm{ctg}^n \alpha \,. \qquad (4)$$

При определении коэффициентов m и n используются две точки, лежащие на графике и имеющие координаты H_1, α_1 и H_2, α_2. Выбор точек основывается на их принадлежности к предполагаемому интервалу высоты и угла откоса накопительного горнотехнического сооружения. В этом случае коэффициенты *n* и *m* определяются по формулам (5–6).

$$n = (\ln H_2 - \ln H_1) \cdot [\ln \mathrm{ctg}(\alpha_2) - \ln \mathrm{ctg}(\alpha_1)]^{-1}, \qquad (5)$$

$$m = H_1 \cdot \mathrm{tg}^n \,.\, \alpha_1 = H_2 \cdot \mathrm{tg}^n \,.\, \alpha_2 \qquad (6)$$

В результате подстановки соответствующих значений возможно определить угол $\alpha = \alpha_{опт}$, обеспечивающий достижение максимального объема V_0

$$\alpha_{опт} = arcctg\left\{1{,}5 \cdot P_0 \cdot (2 \cdot n + 1) - \left[\begin{matrix}2{,}25 \cdot P_0^2 \cdot (2 \cdot n + 1)^2 - \\ -6 \cdot n \cdot S_0 \cdot K_ф \cdot (3 \cdot n + 2)\end{matrix}\right]^{1/2} \cdot \left[m \cdot K_ф \cdot (3 \cdot n + 2)\right]^{-1}\right\}^{1/(n+1)} . \qquad (7)$$

Широко распространенной задачей, при проектировании накопительных горнотехнических сооружений, является определение минимальной площади земельного отвода определенной формы, необходимой для размещения заданного объема вскрыши или некондиционных руд и отходов обогащения. В этом

случае, коэффициент основания подотвальной площади (K_0) необходимо определять по формуле:

$$K_0 = P_0 \cdot S_0^{-1/2}. \quad (8)$$

Решая уравнение (1) относительно площадь основания (S_0), используя введенный коэффициент основания, получим:

$$S_O = \left\{ 0,25 \cdot K_0 \cdot m \cdot ctg^{(n+1)}(\alpha) + \left[V_0 \cdot m^{-1} \cdot ctg^{-n}(\alpha) - m^2 \cdot ctg^{(2n+2)}(\alpha) \cdot \left(\frac{K_\phi}{6} - \frac{K_0^2}{16} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (9)$$

Продифференцировав уравнение (9) по $d(\mathrm{ctg}(\alpha))$, найдем значение угла откоса $\alpha = \alpha_{опт1}$, при котором достигается минимум площади земельного отвода под основание отвала для размещения требуемого объема техногенных пород (V_0):

$$\alpha_{опт1} = arcctg \left\{ \left\{ 3 \cdot V_0 \cdot K_0^2 \cdot \left[M^{\frac{n}{n+1}} \cdot m^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left(3 - 3 \cdot M \cdot K_\phi + M^2 \cdot K_\phi^2 \right) \right]^{-1} \right\}^{\frac{n+1}{3n+2}} \cdot \frac{M}{m} \right\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (10)$$

Полученные зависимости позволяют установить взаимосвязь между максимальной вместимостью и минимальной площадью земельного отвода:

$$V_{\max} = \left(K_0 \cdot M \right)^{\frac{n}{n+1}} \cdot m^{\frac{1}{n+1}} \cdot 0,333 \cdot \left(3 - 3 \cdot M \cdot K_\phi + M^2 \cdot K_\phi^2 \right) \cdot S_0^{\frac{3n+2}{2n+2}}, \quad (11)$$

$$S_{\min} = \left\{ 3 \cdot V_0 \left[\left(K_0 \cdot M \right)^{\frac{n}{n+1}} \cdot m^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left(3 - 3 \cdot M \cdot K_\phi + M^2 \cdot K_\phi^2 \right) \right]^{-1} \right\}^{\frac{2n+2}{3n+2}}. \quad (12)$$

С целью определения поверхности элементов горнотехнических сооружений, расчет площади откосов ($S_{отк}$) и горизонтальных площадок ($S_г$) необходимо осуществлять по формулам:

$$S_{отк} = \left(S^{1/2} \cdot K_0 - 0,5 \cdot K_\phi \cdot H_0 \cdot ctg(\alpha) \right) \cdot H_0 \cdot \left(ctg^2(\alpha) \right)^{1/2}, \quad (13)$$

$$S_Г = H_0 \cdot \left(S_0^{1/2} \cdot K_0 - K_\Phi \cdot H_0 \cdot ctg(\alpha) \right) \cdot \left(ctg(\alpha) - ctg(\alpha_e) \right) \cdot K_0^{-2}, \quad (14)$$

где α_e – угол естественного откоса уступа отвала или угол, приданный ему в результате горнотехнической рекультивации.

На основе установленных аналитических зависимостей произведены расчеты оптимальных значений параметров горнотехнических сооружений на ограниченной площади земельного отвода различной формы в плане, результаты которых представлены на рис. 2.

При определении параметров намывных горнотехнических сооружений оптимальные значения угла внешнего откоса и его высоты зависят в том числе и от степени обводненности приоткосного массива. Представленные в работах [4, 5] методики определения параметров намывных ГтС с учетом экранирующего эффекта донных отложений прудковой зоны, позволяют оценивать влияние степени обводнения откоса ограждающих дамб намывных ГтС. Для намывных

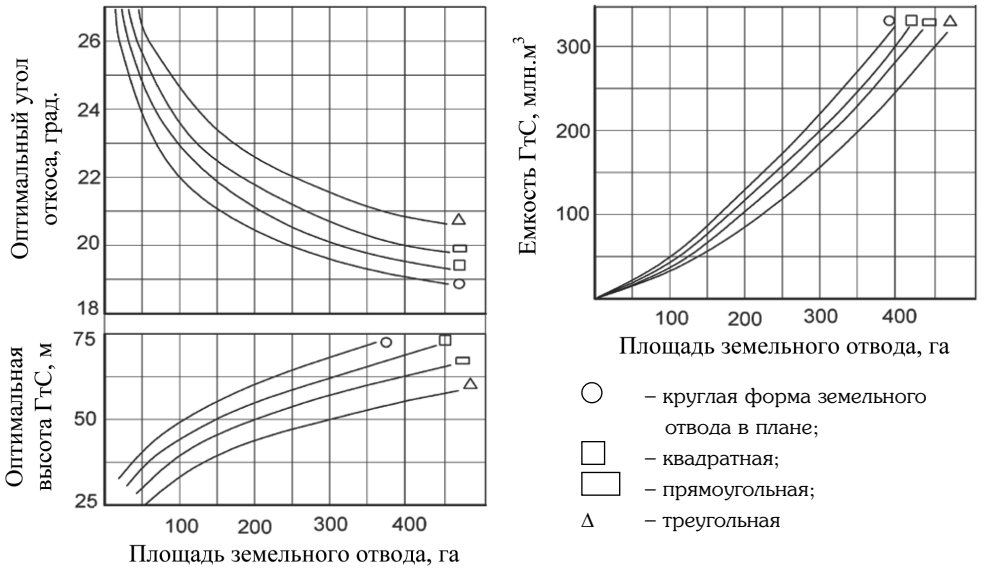

Рис. 2. Графики оптимальных значений угла внешнего откоса и высоты горнотехнических техногенных сооружений на ограниченной площади земельного отвода различной формы в плане

горнотехнических сооружений, формируемых на прочном основании площадью S = 100 га при квадратной форме земельного отвода, были рассчитаны оптимальные значения углов откосов $\alpha_{опт}$ и оптимальной высоты $H_{опт}$, при которых емкость (V_0) накопителей будет максимальной, при различной степени обводнения и эффективности работы дренажных систем (рис. 3).

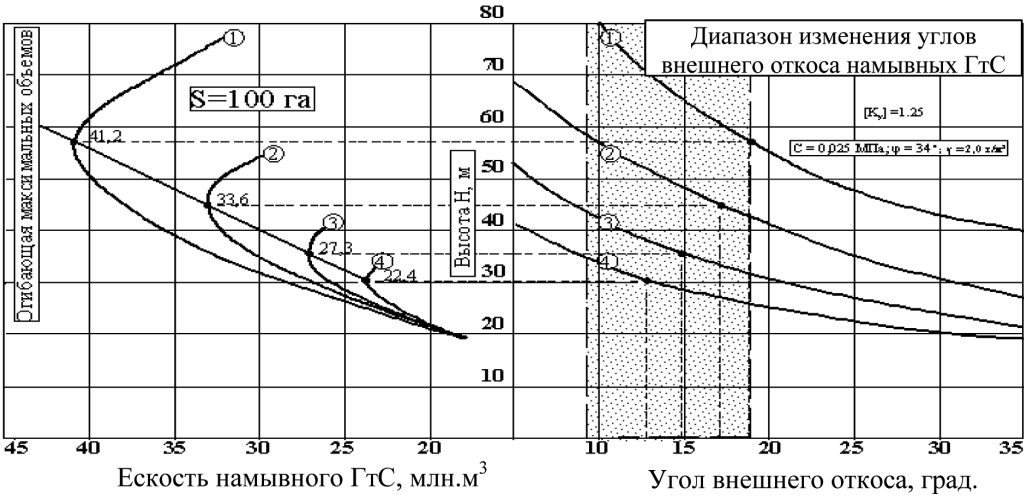

Рис. 3. Вместимость намывного горнотехнического сооружения при различном положении депрессионной кривой: 1 – сухой отвал или тело ограждающей дамбы намывного ГтС не обводнено; 2 – дренажная система работает нормально и перехватывает весь фильтрационный поток; 3 и 4 – частичный или полный выход дренажной системы из строя

Для необводненных накопительных горнотехнических сооружений на этой площади возможно разместить до 41,2 млн м^3 с параметрами откосов, равными $\alpha_{опт}$ = 18,5° и $H_{опт}$ = 57,4 м. Для намывного ГтС с нормально работающей дренажной системой максимальная емкость снижается в следствии воздействия гидродинамических сил и составляет 33,6 млн м^3 при $\alpha_{опт}$ = 17,0° и $H_{опт}$ = 44,2 м. При эксплуатации намывных ГтС без дренажной системы, их емкость на заданной площади земельного отвода снижается в 1,84 раза до величины, равной 22,4 млн м^3.

Выполненный анализ по разработанной методике определения параметров горнотехнических сооружений, учитывающей влияние формы и площади земельного отвода, позволяет сделать следующие выводы:

• наибольшая емкость намывных ГтС на заданной площади земельного отвода достигается при круглой, квадратной или близкой к ним формах;

• при увеличении площади земельного отвода оптимальный угол внешнего откоса уменьшается, а высота сооружения возрастает;

• вместимость земельного отвода зависит от его формы. На круглой форме отвода площадью 400 га при заданных свойствах пород ГтС и основания, вместимость составит 318,2 млн м^3, а при треугольной форме участка той же площади – 245,8 млн м^3, что на 30% меньше;

• при проектировании намывного горнотехнического сооружения каскадного типа расчет оптимальных параметров следует производить с учетом общей площади земельного отвода, а не для отдельных его отсеков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юсфин Ю.С., Карабасов Ю.С., Карпов Ю.А. и др.* Ресурсосбережение и экология в металлургии // Научные школы. МИСиС – 75 лет. – М.: МИСиС, 1997. – С. 272–283.

2. *Селезнев С.Г., Степанов Н.А.* Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Горный журнал. – № 5. – 2011. – С. 32–33.

3. *Мельников Т.И., Мельников И.Т.* Нахождение критических центров поверхностей скольжения с минимальными коэффициентами устойчивости откосов // Гидротехническое строительство. – 1977. – № 7. – С. 37–39.

4. *Мельников И.Т., Гладских В.И., Суров А.И. Кондратьев Л.И., Манушин А.А.* Прогноз фильтрации в теле намывных дамб хвостохранилищ с учетом донных отложений прудковых зон / Материалы 66-й научно-технической конференции. Сборник статей. – Магнитогорск. – 2008. – Т. 1. – С. 173–177.

5. *Мельников И.Т., Суров А.И., Пыталев И.А. и др.* Автоматизированный расчет параметров устойчивости откосов горнотехнических сооружений. Программа для ЭВМ / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613970 от 25.05.2011. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Корнилов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: kornilov_sn@mail.ru,
Мельников Иван Тимофеевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: Starmell@mail.ru,
Пыталев Иван Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vehicle@list.ru,
Павлова Елена Витальевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры, e-mail: Pav-ev-mag@rambler.ru,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова;
Суров Александр Иванович – горный инженер, e-mail: surov.ai@mmk.ru,
горно-обогатительное производство ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

UDC 622.271.75:622:882

RATIONALE FOR THE PARAMETERS OF FACILITIES FOR PLACEMENT MONTAN TAILINGS

Kornilov S.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair,
e-mail: kornilov_sn@mail.ru,
Mel'nikov I.T., Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,
e-mail: Starmell@mail.ru,
Pytalev I.A., Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,
e-mail: vehicle@list.ru,
Pavlova E.V., Candidate of Engineering Sciences, Assistant of Chair,
e-mail: Pav-ev-mag@rambler.ru,
Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov;
Surov A.I., Mining Engineer, *e*-mail: surov.ai@mmk.ru,
JSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works».

The author describes the calculation procedure for the parameters of mine-technical structures, taking into account the structure bottom area and shape in plan view, and the water content of the banking wall rocks. The formulas to find volume of a banking in a general case and in case of a polygonal land allotment for the banking are given. The coefficients of irregular shape figures are calculated in the same way as for elliptical shape figures with major and minor semi-axes. It is possible to calculate unlimited number of shapes, varied laterally and up/down, when designing storage mine-technical structures. In this case, the provision of the rated stability factor is a must.

According to the analysis performed using the proposed procedure, the largest volume of the hydraulic fill banks at the assigned-area land allotment is achieved with the banks of round or square, or close to these, shapes; on the increase in the land allotment, the optimized angle of the outer slope is decreased and the bank height is increased; the capacity of the land allotment depends on its shape. At the round land allotment 400 ha in area, given the assigned properties of rocks meant for the banking and its bottom, the mine-technical structure capacity will amount to 381.2 Mm^3; the same area allotment of the triangular shape will have capacity of 245.8 Mm^3, which is 30% less than in the former case. When designing a cascaded hydraulic fill structure, the calculation of optimal parameters of the structure should take into account the total area of the land allotment rather than the areas of its separate sections.

Key words: parameter, dump, height, volume, slope, waste.

REFERENCES

1. Jusfin Ju.S., Karabasov Ju.S., Karpov Ju.A. *Nauchnye shkoly. MISiS, 75 let* (Scientific schools. 75th anniversary of MISiS), Moscow, MISiS, 1997, pp. 272–283.

2. Seleznev S.G., Stepanov N.A. *Gornyj zhurnal*, no 5, 2011, pp. 32–33.

3. Mel'nikov T.I., Mel'nikov I.T. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*, 1977, no 7, pp. 37–39.

4. Mel'nikov I.T., Gladskih V.I., Surov A.I. Kondrat'ev L.I., Manushin A.A. *Materialy 66-j nauchno-tehnicheskoj konferencii. Sbornik statej* (66th Scientific and Technical Conference Proceedings. Collected Works), Magnitogorsk, 2008, Vol.1, pp. 173–177.

5. Mel'nikov I.T., Surov A.I., Pytalev I.A. Avtomatizirovannyj raschet parametrov ustojchivosti otkosov gornotehnicheskih sooruzhenij. Programma dlja JeVM. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2011613970, 25.05.2011* (Automated calculation of the parameters of the mine-technical structure slope stability. Computer program. State registration certificate for computer program No 2011613970, 25.05.2011).