



ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЗМ ОБРУШЕНИЯ УСТУПОВ КАРЬЕРОВ

Н.А. Годовников¹, В.А. Дунаев²

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

² ОАО «ВИОГЕМ», Россия, 308007, г. Белгород, пр. Б. Хмельницкого, 86

E-mail: godovnikov.nikolay@gmail.com

Изложена, разработанная авторами, компьютерная технология имитационного моделирования деформаций (призм обрушения) уступов карьеров в массивах скальных пород. На примере моделирования наиболее распространенных типов деформаций (клиновой и плоской) применительно к условиям карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» показаны возможности данной технологии для прогнозной оценки устойчивости уступов на предельном контуре карьера.

Ключевые слова: массив скальных пород, карьер, предельный контур, устойчивость, призма обрушения, компьютерная технология, имитационное моделирование.

Одним из направлений решения актуальной проблемы прогнозной оценки устойчивости уступов на предельном контуре карьеров в массивах скальных пород, на которые приходится не менее 70% добычи минерального сырья в нашей стране, является разработка компьютерной технологии имитационного моделирования призм обрушения уступов для выявления наиболее опасного сочетания ограничивающих их трещин при заданных проектных параметрах уступов и сдвиговых характеристиках трещин.

Указанная технология разработана авторами в рамках создания на базе горно-геологической информационной системы ГИС ГЕОМИКС специализированной системы ГИС Устойчивость [1]. При этом были использованы уже имеющиеся функции этой системы: 3d-моделирование призм обрушения уступов и автоматизированный расчет их устойчивости [2].

Математическое описание имитационного моделирования выполнено с использованием аппарата дискретной математики [3], в основе которого лежит понятие "множество" — совокупность объектов, обладающих общим для всех характеристическим свойством. В нашем случае такими объектами являются трещины, а их характеристическим свойством — элементы залегания, т.е. азимут (а) и угол падения (b).

Суть моделирования заключается в оценке коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) призмы (рассчитывается автоматически по известным формулам) на каждом шаге изменения значений а и b трещин, ограничивающих призму. Неустойчивыми считаются призмы, КЗУ которых меньше его критериального значения (КЗУ_{крит}), устанавливаемого как нормативный параметр для конкретного карьера с учетом всей суммы факторов, влияющих на устойчивость уступов, и опыта открытой разработки месторождений-аналогов. По условию $KЗУ \leq KЗУ_{крит}$ отбираются и заносятся в специальный массив данных потенциальные призмы обрушения, каждая из которых характеризуется значениями элементов залегания (а, b) ограничивающих их трещин. С использованием этого массива данных строятся графики распределения количества потенциальных призм обрушения уступов (в % от общего их числа) в зависимости от азимутально-угловых параметров ограничивающих их трещин, устанавливаются наиболее опасные сочетания таких трещин.

Множество всех вариантов азимутов (А), в котором (а) является элементом множества, обозначим ($a \in A$) и зададим формулой:

$$A = \{a \mid a_{i+1} = a_i + h_1; Az_1 \leq a \leq Az_2; h_1 > 0; i = 1, 2, \dots\} \quad (1)$$

где Az_1, Az_2 — азимуты падения трещины соответственно в начале и в конце заданного интервала их значений; h_1 — шаг изменения значений азимута падения трещины.

Множество всех вариантов углов падения (В), в котором (b) является элементом множества обозначим ($b \in B$) и зададим формулой:

$$B = \{b \mid b_{i+1} = b_i + h_2; Ug_1 \leq b \leq Ug_2; h_2 > 0; i = 1, 2, \dots\} \quad (2)$$

где Ug_1, Ug_2 — углы падения трещины соответственно в начале и в конце заданного интервала их значений; h_2 — шаг изменения значений углов падения трещины.

Одна трещина характеризуется множеством вариантов (T_1), состоящим из сочетаний указанных выше пар её параметров (а, b). Множество T_1 является множеством упорядоченных пар, в котором первый элемент каждой пары принадлежит А, а второй В. Оно выражается прямым (декартовым) произведением двух множеств А и В:



$$T_1 = A \times B = \{(a; b) \mid a \in A; b \in B\}, \quad (3)$$

Призмы обрушения в зависимости от их типа ограничиваются одной или несколькими (N) трещинами. Соответственно результирующее множество (T) будет иметь вид:

$$T = \prod_{i=1}^N T_i = \{(t_1, t_2, \dots, t_n) \mid t_1 \in T_1; \dots; t_n \in T_n\} \quad (4)$$

где $t = (a, b)$; t_1 – элемент множества T_1 одной трещины ($t_1 \in T_1$); t_2 – элемент множества T_2 второй трещины ($t_2 \in T_2$) и т.д.

Необходимое для определения количества комбинаций трещин, формирующих призмы в процессе моделирования, выразим через мощность множества T, т.е. числом элементов (C) этого множества:

$$C = |T|. \quad (5)$$

Отбор трещин, образующих потенциально опасные призмы обрушения, осуществляется, как указано выше, по условию: $KЗУ \leq KЗУ_{крит}$. Потенциальные призмы обрушения являются подмножеством (T') множества T: $T' \subset T$. Формула подсчета количества таких призм (C') аналогична формуле (5): $C' = |T'|$.

На основе изложенного выше математического аппарата разработан рекурсивный алгоритм имитационного моделирования призм обрушения уступов карьера любой конфигурации (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема рекурсивного алгоритма имитационного моделирования потенциальных призм обрушения

Данный алгоритм реализован в виде программного модуля StabModeling в составе специализированной геоинформационной системы ГИС Устойчивость. Этот модуль состоит из двух основных окон. Первое из них служит для ввода геометрических параметров уступов карьера и отображения результатов работы программы в графической и табличной форме. Второе окно предназначено для задания параметров имитационного моделирования: тип деформации уступа, критериальное значение КЗУ, набор участвующих в моделировании трещин, интервал значений азимута и угла падения каждой трещины и шаг изменения этих значений, плотность слагающей данный уступ карьера горной породы, сдвиговые характеристики (сцепление и угол внутреннего трения) по трещинам. Визуальное оформление программы и часть функционала обработки данных осуществляется библиотекой компонентов DevExpress [4].

Разработанная компьютерная технология имитационного моделирования реализована для двух наиболее распространенных типов деформаций уступов карьера (клинового и плоского). Клиновые деформации обуславливаются сочетанием двух диагональных относительно простирания уступа трещин, падающих навстречу друг другу и в сторону карьерной выемки. Угол между простиранием уступа и простиранием клиноформирующих трещин колеблется от 21° до 70°, а угол падения этих трещин от 30° до 90° [5]. Плоский тип деформаций вызывается трещинами субпараллельными простиранию уступа и падающими в карьер более полого, чем откос уступа. Диапазоны изменения угла падения трещин от 30° до угла падения откоса уступа.



Имитационное моделирование выполнено применительно к условиям карьера рудника "Железный" ОАО "Ковдорский ГОК", разрабатывающего с 1962 года Ковдорское апатит-магнетитовое месторождение в массиве скальных пород: высота уступов на предельном контуре карьера – 24 м, средний угол откоса – 70°, ширина бермы – 20 м, средняя плотность вмещающих пород 2800 кг/м³; сдвиговые характеристики по трещинам: сцепление (c') – 28800 Па, угол внутреннего трения (ϕ') – 23°; $KЗУ_{крит} = 1.2$.

Имитационное моделирование клиновой деформации выполнено с шагом изменения азимута и угла падения трещин, равным 2°. При этом на каждом шаге производился автоматический расчет КЗУ призмы обрушения по формуле [5]:

$$KЗУ = \frac{P \cdot \cos\psi \cdot \operatorname{tg}\phi' + c'(S_{\text{тр}1} + S_{\text{тр}2})}{P \cdot \sin\psi},$$

где P – вес призмы, ψ – угол наклона линии скрещения трещин; c' – сцепление по трещинам; ϕ' – угол внутреннего трения по трещинам; $S_{\text{тр}1}$, $S_{\text{тр}2}$ – площади боковых граней призмы по трещинам.

Вес призмы определялся по формуле:

$$P = mg = V\gamma g$$

где m – масса призмы, кг; V – объем призмы, м³, γ – плотность пород, кг/м³, g – ускорение свободного падения (9.81), м/с².

Основные результаты имитационного моделирования клиновых призм обрушения сводятся к следующему. Угол между азимутами простираения трещин, формирующих потенциальные призмы обрушения, КЗУ которых $\leq KЗУ_{крит}$, колеблется от 55 до 137° при среднем его значении (математическом ожидании) 95.5° и доверительном интервале 78–113°, включающем 67.6% таких призм. Наибольшее количество потенциальных призм обрушения характерно для варианта, когда линии простираения клиноформирующих трещин субперпендикулярны (рис. 2,а). При этом в интервале значений угла наклона откоса уступа 70–90° мода угла между азимутами простираения указанных трещин равна 90°, а с уменьшением угла наклона до 60° она увеличивается до 107°.

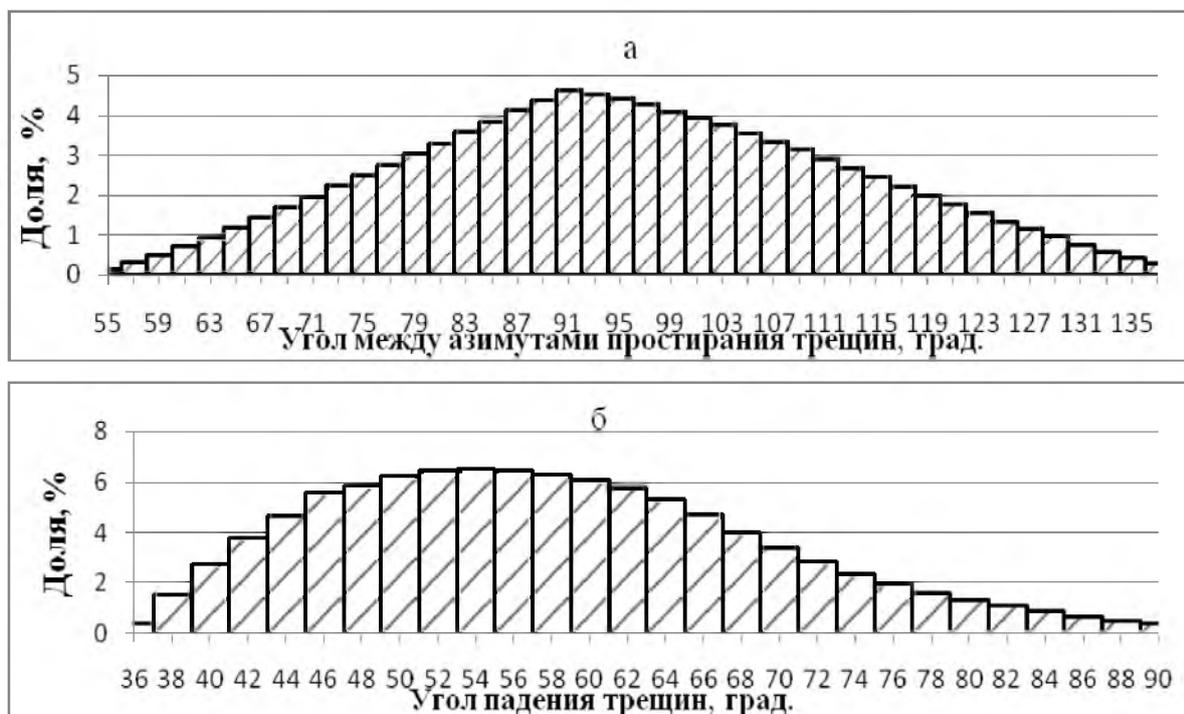


Рис. 2. Распределение количества потенциальных клиновых призм обрушения уступов в зависимости от угла между азимутами простираения (а) и угла падения (б) клиноформирующих трещин



Угол падения трещин, формирующих потенциальные призмы обрушения, колеблется от 36° до 90° при среднем его значении (математическом ожидании) 58° и доверительном интервале 46-70°, включающем 72.9% таких призм. Наибольшее количество потенциальных призм обрушения соответствует значению моды угла падения трещин, равному 54° (рис. 2,б).

Установлено также, что при заданных параметрах моделирования наиболее опасная (с минимальным значением КЗУ) призма обрушения образуется трещинами симметричными относительно перпендикуляра к поверхности уступа. При этом угол между азимутами простирания трещин составляет 137°, а угол их падения 48° (рис. 3,а). Наиболее устойчивая потенциальная призма обрушения (с максимальным значением КЗУ, приближающимся к КЗУ_{крит}) ограничивается трещинами следующего залегания. Одна из трещин (1) падает под углом 46°, а линия её простирания образует с простиранием уступа угол, равный 53°. Указанные параметры для другой трещины (2) составляют соответственно 82° и 62° (рис.3, б).

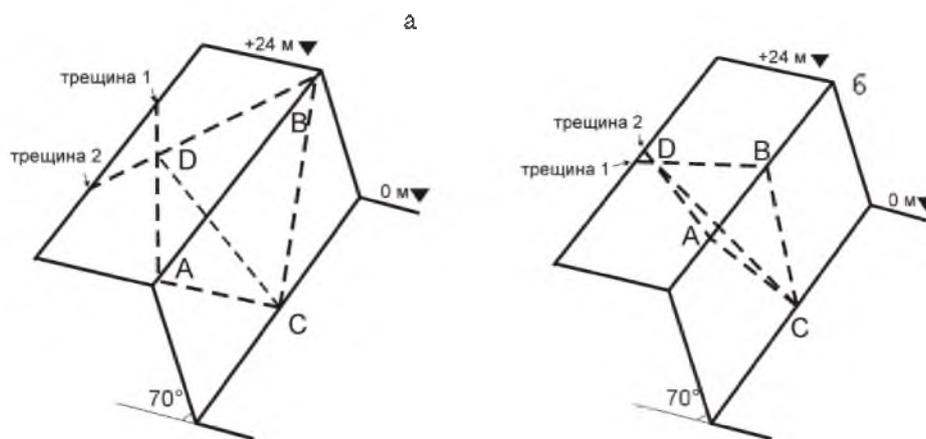


Рис. 3. Конфигурация наименее (а) и наиболее (б) устойчивой потенциальной призмы обрушения уступов карьера (ADBC – призма обрушения)

Имитационное моделирование плоской деформации уступов карьера проведено с шагом изменения угла падения ограничивающей призму обрушения трещины, равным 1°, в диапазоне значений этого угла 30-90°, по четырем вариантам угла откоса уступа: 60, 70, 80, 90°. Значения остальных параметров, используемых в процессе моделирования, аналогичны тем, которые применялись при моделировании клиновых деформаций.

Расчет устойчивости плоской призмы выполнялся по формуле [5]:

$$КЗУ = ctg\lambda \cdot tg\varphi' + \frac{2c' \sin(\alpha)}{\gamma \cdot g \cdot h \cdot \sin(\alpha - \lambda) \cdot \sin(\lambda)}$$

где КЗУ – коэффициент запаса устойчивости; λ – угол падения трещины, по которой возможно обрушение, град.; φ' – угол трения по поверхности этой трещины, град.; α – угол откоса уступа, град.; h – высота уступа, м; γ – плотность пород, кг/м³; g – ускорение свободного падения (9.81), м/с²; c' – сцепление по трещине, Па.

Основные результаты имитационного моделирования при заданной высоте уступа (24 м) сводятся к следующему. Установлено, что неустойчивые плоские призмы обрушения уступов карьера формируются трещинами, падающими в сторону карьерной выемки под углами, интервал значений которых зависит от угла откоса уступа: 60°(30-54°), 70°(30-65°), 80°(30-75°), 90°(30-86°). С увеличением угла падения трещины, ограничивающей плоскую призму обрушения, коэффициент запаса её устойчивости постепенно уменьшается, достигает минимального, а затем быстро увеличивается (рис. 4). Точки перегиба графиков, приведенных на указанном рисунке, фиксируют критериальные значения углов падения трещин, формирующих наиболее неустойчивые плоские призмы обрушения уступов с заданным углом откосов.

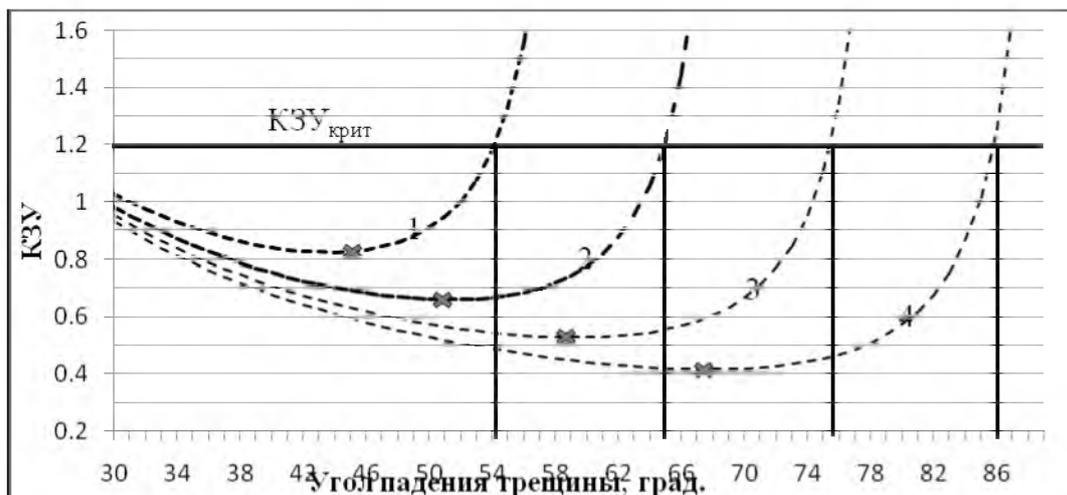


Рис. 4. График зависимости КЗУ плоской призмы обрушения уступов от угла падения формирующей её трещины для уступов с углом откоса 60° (1), 70° (2), 80° (3), 90° (4). Крестиком на графиках показана точка, соответствующая минимальному значению КЗУ призмы

Угол падения трещины, ограничивающей самую неустойчивую призму обрушения, увеличивается с увеличением угла откоса уступа практически по линейной зависимости. Точно график этой зависимости аппроксимируется функцией полинома второй степени (корреляционное отношение 1.0) (рис. 5). Используя установленную зависимость можно определить угол падения трещины, обуславливающей самую неустойчивую призму обрушения, для уступов с любым углом откоса (при заданной высоте уступа).

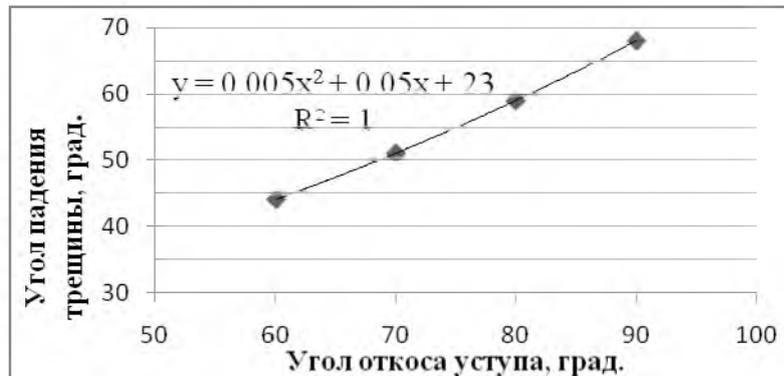


Рис. 5. График зависимости угла падения трещины, фиксирующей наиболее неустойчивую плоскую призму обрушения, от угла откоса уступа при заданной (24 м) его высоте

Выводы

1. В составе специализированной системы ГИС Устойчивость разработана компьютерная технология имитационного моделирования призм обрушения уступов карьеров в массивах скальных пород.

2. Данная технология апробирована применительно к условиям карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» для двух наиболее распространенных типов деформаций уступов (клиновой и плоской).

3. Основные результаты выполненного моделирования:

а) потенциальные клиновые призмы обрушения уступов формируются двумя падающими под углом 36-90° навстречу друг другу и в сторону карьерной выемки трещинами, угол между азимутами простирания которых колеблется в интервале 55-137°, но самое большое количество таких призм возникает в том случае, когда трещины простираются субперпендикулярно друг к другу и падают под углом 54°; наиболее неустойчивой является призма, образованная симметричными относительно перпендикуляра к поверхности уступа трещинами, падающими под углом 48° (угол между азимутами их простирания 137°), а наиболее устойчивой



является призма, ограниченная трещинами, одна из которых падает под углом 46° и образует с простиранием уступа угол 53° , а другая характеризуется следующими значениями указанных параметров: 62° и 82° ;

б) потенциальные плоские призмы обрушения уступов обусловлены субпараллельными их простиранию трещинами, падающими в сторону карьерной выемки под углом, диапазон значений которого зависит от угла откоса уступа; установлена аналитическая зависимость, позволяющая по значению угла откоса уступа определить угол падения трещины, формирующей самую неустойчивую призму обрушения при заданной высоте уступа.

Список литературы

1. Дунаев В.А., Годовников Н.А. Оценка и прогноз устойчивости уступов карьеров в массивах скальных пород на основе геоинформационных технологий // Горный инф.-аналит. бюлл. – 2014. – №4. – С. 134-137.
2. Серый С.С., Годовников Н.А., Агарков И.Б. Информационно-аналитическое и программное обеспечение моделирования и автоматизированного расчета устойчивости потенциальных призм обрушения уступов карьеров в массивах скальных пород. // Горный инф.-аналит. бюлл. – 2013. – №4.
3. Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов. – СПб: Питер, 2001. – 304 с.
4. DevExpress VCL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.devexpress.com/Products/VCL/> (дата обращения: 10.04.2014).
5. Попов В.Н., Байков Б.Н. Технология отстройки бортов карьеров. – М.: Недра, 1991. – 252 с.

IMITATION MODELING OF PRISMS OF A COLLAPSE OF THE LEDGES OPEN PIT

N.A. Godovnikov¹, V.A. Dunaev²

¹Belgorod State National
Research University, Russia,
308015, Belgorod, Pobedy St., 85

²OJSC "VIOGEM", Russia, 308007,
Belgorod, av. B. Khmelnytsky, 86

E-mail:
godovnikov.nikolay@gmail.com

Developed by the authors computer technology of the imitation modeling of deformation (collapse prisms) of the ledges of open pit in the rock massif is described. The most common deformation types (wedge and planar) are modeled with mine "Iron" OJSC "Kovdorsky GOK" as an example. The possibilities of the technology given have been presented for the forecast estimation of stability on critical contour of an open pit.

Key words: rock massif, open pit, critical contour, stability, prism of a collapse, computer technology, imitation modeling.