

УДК 622.271.3.014.2:658.612.21]: 681.3

В.М. Аленичев

**АЛГОРИТМ ДИАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОНТУРА КАРЬЕРА В ДИНАМИКЕ РАЗВИТИЯ
ГОРНЫХ РАБОТ**

Изложен алгоритм построения контуров уступов карьера при диалоговом моделировании развития горных работ на действующем карьере с учетом вскрытия внутренними траншеями. Разработан математический аппарат построения скользящих съездов, обеспечивающий автоматизированное моделирование карьерного пространства.

Ключевые слова: алгоритм, контур уступа, моделирование, карьер, вскрытие, внутренняя траншея, скользящий съезд.

Статья посвящена моделированию контуров карьера по горизонтам при активном участии горного инженера-технолога путем составления альтернативных вариантов формирования карьерного пространства, обеспечивающих добычу полезного ископаемого заданного количества и качества при условии выполнения требований «Единых правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом».

При формировании выработанного пространства из нескольких «локальных» карьеров появляются пересекающиеся нижние и верхние бровки одноименных (по отметке горизонта) уступов. Элементы бровок, принадлежащие области пересечения пространств «локальных карьеров», исключаются из контуров каждого «локального» карьера и производится соединение одноименных бровок на всех уступах «объединенного» карьера. Технологические параметры по варианту (этапу) формирования карьерного пространства задаются в специальной таблице. Следовательно, при пересечении пространств «локальных» карьеров, начиная с некоторого горизонта и заканчивая верхними, будут иметь место общие нижние и верхние бровки уступов.

Исходной информацией для моделирования динамики развития карьерного пространства являются модель месторождения и технологические параметры элементов системы разработки: высота уступов, ширина рабочих площадок и предохранительных берм, углы рабочего и устойчивого откоса уступов, допустимые радиусы искривления фронта работ и борта карьера. Дополнительно необходимы следующие сведения: направление развития съездов, их уклоны, ширина по дну длина площадок примыкания по горизонтам, углы откоса бортов траншеи.

Моделирование карьерного пространства при углубочной системе разработки начинается с анализа возможности понижения дна карьера, т.е. проходки вскрывающей траншеи по всему дну карьера или его части. Для этого предусматривается построение верхней (фиктивной) бровки траншеи, вскрывающей «нижележащий» уступа. После этого пользователь проводит анализ ситуации:

1) если верхняя бровка вскрываемой траншеи (BORTH)₁ лежит за пределами границы (BORTL)_д нижней бровки дна карьера, то вскрытие нижележащего горизонта невозможно;

2) если верхняя бровка вскрываемой траншеи (BORTH)₁ лежит внутри области, ограниченной нижней бровкой дна карьера (BORTL)_д, то вскрытие нижележащего горизонта возможно;

3) если некоторые участки верхней бровки вскрываемой траншеи (BORTH)₁ лежат внутри области, ограниченной верхней бровкой (BORTL)_д, то решение принимает пользователь с учетом отклонения на некоторых участках ширины площадки от нормативов и дефицита фронта добычных работ.

Последующие решения по вскрытию нового горизонта можно свести к следующим вариантам:

– стационарный съезд располагается по контуру будущего вскрываемого уступа в его «предельном» положении на дне карьера с направлениями развития относительно центра вскрываемого горизонта по ходу или против хода часовой стрелки;

– скользящий съезд располагается внутри контура будущего уступа.

В общем случае длина съезда определяется по формуле:

$$L_c = 1000k_p \left(\frac{h_{yc}}{i} \right), \quad (1)$$

где L_c — длина съезда, м; k_p — коэффициент развития трассы (на съезде), $k_p = 1.05 - 1.1$; h_{yc} — высота вскрываемого уступа (глубина опускания съезда), м; i — уклон съезда, промилля.

В качестве первой точки линии съезда со стороны борта карьера принимается точка на верхней фиктивной бровке вскрываемого уступа (BORTH)_д, т.е.

$$x_0 = x_j, \quad y_0 = y_j, \quad z_0 = z_j, \quad (2)$$

где x_0, y_0, z_0 — координата первой точки ($c = 0$) линии съезда со стороны борта карьера, $c = 0, \dots, k, \dots, n$; n — число вершин линии съезда со стороны борта карьера; x_j, y_j, z_j — координата точки начала съезда на верхней бровке фиктивной (вскрываемого) уступа (BORTH)_д.

Координаты последующих точек ($c = c+1$) линии съезда вычисляются относительно точек фиктивной бровки по формулам:

$$\begin{aligned} x_c &= x_{j+c} + (0.001L_{j+c, j+c+1} \times i - (z_0 - z_{j+c})) \operatorname{ctg} \alpha_{yc} \cos(\alpha_{[L_{j+c, j+c+1}]} + 90^\circ), \\ y_c &= y_{j+c} + (0.001L_{j+c, j+c+1} \times i - (z_0 - z_{j+c})) \operatorname{ctg} \alpha_{yc} \sin(\alpha_{[L_{j+c, j+c+1}]} + 90^\circ), \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_{j+c}, y_{j+c}, z_{j+c}$ — координаты вершины фиктивной верхней бровки (BORTH)_д уступа, относительно которой вычисляется c -я координата съезда; $L_{j+c, j+c+1}$ — длина отрезка от точки $j+c$ до точки $j+c+1$, принадлежащего верхней фиктивной бровке (BORTH)_д,

$$L_{j+c, j+c+1} = \left[(x_{j+c+1} - x_{j+c})^2 + (y_{j+c+1} - y_{j+c})^2 + (z_{j+c+1} - z_{j+c})^2 \right]^{0.5}, \quad (4)$$

где α_y — угол откоса уступа траншеи съезда со стороны целика, град.;
 $\alpha_{[j+c, j+c+1]}$ — угол между отрезком $l_{j+c, j+c+1}$ и положительным направлением оси ОХ
в точке $j+c$.

Длина съезда от его начала ($c = 0$) до точки ($c \leq n$) определяется по формуле:

$$l_{0,c} = \sum_0^{c=n} l_{c,c+1} / \cos \operatorname{arctg}(0.001i), \quad (5)$$

где $l_{c,c+1}$ — горизонтальное расстояние между концами отрезков, аппроксимирующих верхнюю фиктивную бровку (BORTH)_д.

Высотная отметка c -й точки съезда определяется по формуле:

$$z_c = z_j - 0.001 \sum_0^c l_{c,c+1} \times i / k_p, \quad (6)$$

$$l_{c,c+1} = \left[(x_{j+c+1} - x_{j+c})^2 + (y_{j+c+1} - y_{j+c})^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

где z_j — высотная отметка начала съезда.

Условию примыкания съезда к вскрываемому горизонту:

$$z_c = z_{\text{пр.отм.дна}} - h_{\text{ус.пр.}} \quad (7)$$

$$\text{или } z_c = z_{\text{пр.отм.вскр.гор.}}, \quad (8)$$

где $z_{\text{пр.отм.дна}}$ — проектная отметка горизонта, на котором располагается существующее дно карьера; $h_{\text{ус.пр.}}$ — проектная высота вскрываемого уступа;

$z_{\text{пр.отм.вскр.гор.}}$ — проектная отметка подошвы вскрываемого уступа.

При каждом удлинении съезда (переход от точки j -й к точке $(j+1)$ -й) по бровке (BORTH)_д проверяется соответствие полученной (5) и необходимой (1) длины. При этом возможны следующие случаи:

$$|L_c - l_{0,c}| \leq \Delta L_0, \quad (9)$$

$$l_{0,c} - L_c > \Delta L_0, \quad (10)$$

где ΔL_0 — допустимое (принятое) несовпадения расчетной длины съезда с технологически необходимой, $\Delta L_0 = 0,1\text{м}$.

При выполнении условия (9) конечная точка линии съезда со стороны борта карьера совпадает с точкой c . В этом случае установлена технологически необходимая длина съезда. В противном случае продолжается вычисление координат следующей вершины линии съезда (осуществляется переход к следующей точке верхней бровки: $j = j + 1$). При выполнении условия (10) осуществляется возврат на предыдущую вершину линии съезда ($c = c - 1 = n$) и находится точка пересечения отрезка $[n - 1, n]$, соединяющего предпоследнюю и последнюю точки оси съезда, и окружности с центром в точке c и радиусом равным R :

$$R = l_{0,c} - L_c, \quad (11)$$

Из двух точек пересечения прямой, совпадающей с отрезком $l_{n-1,n}$, и окружности выбирается точка, максимально удаленная от начала съезда ($c = 0$). Данная точка является концом линии съезда на вскрываемый горизонт и включается в общее число точек ($c = c - 1 + 1 = n$).

Координата «окончания» съезда по верхней бровке траншеи определяется точкой пересечением отрезка $[j + c, j + c - 1]$ с прямой, проходящей через вершину c ($c = n$) и образующей с положительным направлением оси ОХ угол равный $\alpha_{[j+c, j+c-1]} + \arctg 0.001 * i - 90^0$. Уравнение этой прямой

$$y - y_c = (x - x_c) \operatorname{tg}(\alpha_{[j+c, j+c-1]} + \arctg 0.001 * i - 90^0), \quad (12)$$

где x_c, y_c — координаты последней точки ($c = n$) линии съезда со стороны борта карьера.

Полученная линия съезда переименовывается в тип линии, соответствующий положению съезда (временный, предельный) с размещением в слое проектной отметки существующего дна карьера (горизонт начала съезда).

Вторая линия съезда строится методом подобия относительно первой, шаг переноса равен ширине съезда. При построении второй линии съезда (ближайшей к «выработанному пространству») используется отрезок $[j, j + 1]$ верхней фиктивной бровки (BORTH)_д, точка начала съезда и направление переноса линии:

– уравнение прямой, проходящей через точку j начала съезда (BORTH)_д, и перпендикулярной к отрезку $[j, j + 1]$:

$$y - y_j = (x - x_j) \operatorname{tg}(\alpha_{[j, j+1]} + 90^0), \quad (13)$$

– перенос линии съезда относительно точки (x_0, y_0) производится в сторону будущего выработанного пространства согласно вектора, начало которого в точке j бровки (BORTH)_д, направление — угол $\alpha_{[j, j+1]} + 90^0$ и ширина съезда — b_c .

Координаты точки начала второй линии съезда определяются по формулам:

$$x_c = x_0 + b_c \cos(\alpha_{[j, j+1]} + 90^0),$$

$$y_c = y_0 + b_c \sin(\alpha_{[j, j+1]} + 90^0).$$

Высотная отметка z_c этой точки определяется с использованием триангуляции Делоне. Допустимое отклонение высотных отметок пунктов (точек) z_c и z_c относительно ближайших пунктов маркшейдерской опорной геодезической сети при съемке карьеров согласно Инструкции по производству маркшейдерских работ не должно превышать 0,2 м.

Процедура построения верхней бровки траншеи со стороны выработанного пространства сводится к вычислению ее координат относительно линии съезда со стороны будущего выработанного пространства. Расчет начинается с точки начала съезда, которая одновременно является первой точкой $B_0(x_c, y_c, z_c)$ верхней бровки. Координаты последующих вершин верхней бровки B_γ ($\gamma = 0,$

n) определяются по формулам (при $\gamma = 0$ — первая точка ($c = 0$) линии съезда со стороны борта карьера, $c = 0, \dots, k, \dots, n$):

$$\begin{aligned}x_{\gamma} &= x_c + (z_{пр.дн} - z_c) ctg\alpha_y \sin(\alpha_{[0,\gamma]} + \arcsin 0.001 l_{[0,\gamma]} \times i + 90^0), \\y_{\gamma} &= y_c + (z_{пр.дн} - z_c) ctg\alpha_y \cos(\alpha_{[0,\gamma]} + \arcsin 0.001 l_{[0,\gamma]} \times i + 90^0), \\z_{\gamma} &= z_c + (z_{пр.дн} - z_c) tg\alpha_y,\end{aligned}\tag{14}$$

где $z_{пр.дн}$ — проектная отметка фактического дна карьера; $\alpha_{[0,\gamma]}$ — угол между положительным направлением оси z и отрезком $[0, \gamma]$.

С использованием триангуляции Делоне определяется фактическая отметка поверхности дна карьера $z_{факт.\gamma}$ в точке $\gamma(x_{\gamma}, y_{\gamma})$. При этом возможны следующие случаи:

$$| z_{факт.\gamma} - z_{\gamma} | \leq \Delta z_0,\tag{15}$$

$$| z_{факт.\gamma} - z_{\gamma} | > \Delta z_0,\tag{16}$$

где $z_{факт.\gamma}$ — фактическая отметка дна карьера в точке $\gamma(x_{\gamma}, y_{\gamma})$; $z_{пр.дн}$ — проектная отметка фактического дна карьера;

Δz_0 — допустимая погрешность определения по высоте пунктов относительно ближайших пунктов маркшейдерской опорной геодезической сети при съемке карьеров, $\Delta z_0 = 0.2$ м.

При выполнении условия (14) осуществляется переход к следующей точке съезда ($c = c + 1$).

Выражения (16) характеризует в точке $\gamma(x_{\gamma}, y_{\gamma})$ разницу отметок фактической поверхности существующего дна карьера от прогнозируемой, превышающую допустимую погрешность определения высоты пункта. Обусловлено это тем, что на предыдущем этапе расчетов (система уравнений (14)) отметка поверхности уступа определялась исходя из угла наклона борта траншеи и прогнозируемой ее глубины в точке $\gamma(x_{\gamma}, y_{\gamma})$. При этом возможны два случая:

– превышение фактической отметки над прогнозируемой

$$z_{факт.\gamma} - z_{\gamma} > \Delta z_0,\tag{17}$$

– превышение прогнозируемой отметки над фактической

$$z_{\gamma} - z_{факт.\gamma} > \Delta z_0,\tag{18}$$

следовательно, в любом случае необходима корректировка расчетной высоты верхней бровки траншеи.

Если выполняется условие (17), то вершину верхней бровки траншеи необходимо сдвинуть в сторону будущего выработанного пространства карьера; при удовлетворении условия (18) — вершину верхней бровки траншеи необходимо сдвинуть в сторону борта карьера.

Координаты нового положения вершины определяются по ниже приведенным формулам при условии, что удовлетворяется ограничение Δz_0 :

$$\begin{aligned}
x_{\gamma}^* &= x_c + (z_{пр.дн} - z_c + z_{факт.дн} - z_{\gamma}) ctg\alpha_{yc} \cos(\alpha_{c+1,c} + \arcsin 0.001 l_{[0,\gamma]} \times i + 90^0), \\
y_{\gamma}^* &= y_c + (z_{пр.дн} - z_c + z_{факт.дн} - z_{\gamma}) ctg\alpha_{yc} \sin(\alpha_{c+1,c} + \arcsin 0.001 l_{[0,\gamma]} \times i + 90^0), \\
z_{\gamma}^* &= z_c + (z_{пр.дн} - z_c + z_{факт.дн} - z_{\gamma}) tg\alpha_{yc}
\end{aligned} \quad (19)$$

Иначе вместо координат $x_c y_c z_c$ подставляются координаты $x_{\gamma} y_{\gamma} z_{\gamma}$. После каждого расчета по формулам (19) проверяются соотношения (15, 16). Если окажется, что условие (15) выполняется, то последующая корректировка координат вершины верхней бровки относительно точки c прекращается. В этом случае точка $\gamma(x_{\gamma} y_{\gamma} z_{\gamma})$ принимается в качестве вершины верхней бровки траншеи со стороны будущего выработанного пространства. При $c < n$ ($c = 1, \dots, n$) производится переход к следующей точке линии съезда ($c = c + 1$). При выполнении условия (16) расчеты по определению координат повторяются с предварительной заменой в правой части формул (19) следующих величин:

$$x_{\gamma}^* \Rightarrow x_{\gamma}, \quad y_{\gamma}^* \Rightarrow y_{\gamma}, \quad z_{\gamma}^* \Rightarrow z_{\gamma}. \quad (20)$$

После формирования верхних бровок наклонной траншеи осуществляется формирование съезда в виде горной выработки. Для этого последние точки левой и правой линий съезда, а также верхняя бровка наклонной траншеи должны быть соединены типом линии соответственно нижней (BORTL) и верхней (BORTH) бровками уступа. Вершины этих линий определяются следующим образом:

- 1) в конце съезда проводится полуокружность, обеспечивающая в дальнейшем получение выпуклой фигуры контура съезда, радиусом равным полуширине съезда ($b_c/2$) с центром, расположенным на середине отрезка, соединяющего последние точки линий;
- 2) полуокружность аппроксимируется ломаной линией с количеством вершин, определяемых согласно [1];
- 3) ломаная линия переименовывается в BORTL с размещением в слое, имя которого соответствует отметке вскрываемого горизонта;
- 4) строится верхняя бровка уступа BORTH с размещением в слое, имя которого соответствует отметке существующего дна карьера, относительно нижней BORTL методом подобия на расстоянии равном $h_{yc}^* ctg\alpha_{yc}$ (α_{yc} ранее задается пользователем по запросу об угле откоса уступа);
- 5) точки верхней бровки траншеи съезда (начало съезда) соединяются отрезком, который затем переименовывается в BORTH с отметкой слоя проектного (существующего) дна карьера и включается (объединяется) с ранее построенной верхней бровкой траншеи образуя замкнутый контур на горизонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аленичев В.М., Суханов В.И., Хохряков В.С. Моделирование природно-технологических комплексов (горное производство)/ Под ред. В.Л. Яковлева. — Екатеринбург: УрО РАН. — 1998. — 147 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Аленичев Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор, действительный член АГН, главный научный сотрудник, alenichev@igduran.ru
Институт горного дела Уральского отделения РАН.