

Т. В. КУНДРИК, Е. И. СМЕРНОВ

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ИСХОДНЫМ ДАННЫМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МАРКШЕЙДЕРСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Основная задача автоматизированной системы маркшейдерского обеспечения карьера (АСМОК) заключается в своевременном и высококачественном снабжении заинтересованных служб маркшейдерской документацией для осуществления наиболее полного и комплексного использования месторождения, эффективного и безопасного ведения горных работ. При этом необходимы, во-первых, оперативность обработки данных, во-вторых, точность обработки информации, в-третьих, комплексное решение задач машинной графики, обеспечивающее автоматизированное составление маркшейдерских чертежей в удобной для анализа и последующего использования форме, и, наконец, повышение точности и достоверности определения объемов вынудой горной породы. Последнее требование едва ли не самое главное, так как маркшейдерский учет объемов вынудой горной породы должен обеспечивать контроль выполнения предприятием государственного плана разработки месторождения, а также давать исходный материал для движения промышленных запасов и контроля потерь полезного ископаемого.

Наиболее важной составной частью АСМОК, разрабатываемой во Львовском политехническом институте, служит цифровая модель карьера (ЦМК), выполняющая функции маркшейдерского плана карьера. ЦМК создается и пополняется на основании материалов стереофотограмметрической съемки, в некоторых случаях предусматривается использование тахеометрической съемки. Все функциональные задачи, включая определение объема вынудой горной породы, решают на основании ЦМК.

Учитывая особую значимость определения объемов, рассмотрим требования к исходным данным с точки зрения точностных характеристик определения объема.

В рассматриваемой системе в основу методики определения объемов вынудой горной породы положен способ сечений [5]. Методика непосредственных вычислений использует метод численного интегрирования по формуле трапеции:

$$V = \sigma_x \sum_{i=2}^{n-1} S_i, \quad (1)$$

где V — объем вынудой горной породы; σ_x — фиксированное расстояние между сечениями; S_i — площадь i -го сечения блока; n — количество сечений заданного блока.

Площади первого и последнего сечений равны нулю, поскольку их выбирают таким образом, чтобы выработка на них не выполнялась.

Основными факторами, влияющими на точность вычисления объема, а следовательно, определяющими требования к исходным данным, можно считать: методическую ошибку, ошибку определения координат точек ЦМК и ошибку аппроксимации реального блока моделируемым телом.

Формализовать первые два фактора не составляет труда, третий рассматриваем как случайный. Однако это не свидетельствует о том, что первые две ошибки не содержат случайных составляющих.

Методическую ошибку формулы трапеции можно получить из выражения [2]

$$\Delta V_1 = \frac{\sigma_X^3}{12} F'' \sqrt{n-1}. \quad (2)$$

Здесь $F'' \sqrt{n-1} = - \sum_{i=2}^{n-1} f''(\xi)$, где $f''(\xi)$ — вторая производная функции (S) в точке, лежащей на заданном отрезке (σ_X) элементарного блока.

Ошибки определения координат точек ЦМК обуславливает действующая инструкция [3]. Для оценки влияния этой ошибки на точность вычисления объема вначале запишем ошибку вычисления площади сечения в виде

$$\Delta S = m_K \sqrt{l^2 + h^2}, \quad (3)$$

где m_K — ошибка координат точек ЦМК; l — глубина заходки; h — высота блока вынудой горной породы.

Таким образом, на основании формулы (1) можно записать ошибку определения объема как функцию от погрешности координат точек ЦМК:

$$\Delta V_2 = \sigma_X m_K \sqrt{l^2 + h^2} (n-1). \quad (4)$$

Как уже указывалось, ошибку аппроксимации реального блока моделируемым телом аппроксимировать не представляется возможным. Однако действующая инструкция [4] определяет допустимую ошибку вычисления объема вынудой горной породы для блоков, разрабатываемых рыхлением взрывом, которую можно записать в виде

$$\Delta V = 22\sqrt{V}. \quad (5)$$

Для формализации ошибки определения объема вынудой горной породы выбран макет блока с параметрами $V=60$ тыс. м³, $l=20$ м, $h=15$ м. Используя методы численного нахождения производных [2], на основании обработки более 300 сечений, полученных на реальных блоках Акции-Спасского карьера Джезказганского ГМК, найдено среднестатистическое значение $F'' =$

$= -0,54$. Полагая $\sigma_x = 20$ м и $n = 10$, по формулам (2), (4) и (5) имеем для макета предельную ошибку аппроксимации «реального» блока моделью:

$$\Delta V_3 = 22 \sqrt{V} - \left| -\frac{\delta \lambda^3}{12} F'' \sqrt{n-1} \right| - \sigma_x m_K \sqrt{(l^2 + h^2)(n-1)} =$$

$$= 3408,9 \text{ м}^3. \quad (6)$$

Отсюда легко оценить соотношения составляющих общей ошибки определения объема вынудой горной породы. Так, методическая ошибка составляет примерно 20%, ошибка определения координат 15% и ошибка аппроксимации 65%. Следовательно, ошибка определения объема вынудой горной породы в основном зависит от точности аппроксимации реального блока моделью. Уменьшить эту ошибку можно за счет более частого сечения блока.

Допустим, что имеются численные значения производных функции, описывающих площади сечений, тогда для истинного значения объема вынудой горной породы справедливы равенства

$$V = \sigma_x \sum_{i=2}^{n-1} S_i + \frac{\sigma_x^3}{12} F'' \sqrt{n-1}; \quad (7)$$

$$V = \sigma_x \sum_{i=2}^{n-1} S_i + \sigma_x F' \sqrt{n-1}. \quad (8)$$

Здесь $F' \sqrt{n-1} = \sum_{i=2}^{n-1} f'(\xi)$, где $f'(\xi)$ — первая производная функция (S) в точке, лежащей на заданном отрезке (σ_x) элементарного блока.

Исходя из особенностей поправочных членов, можно утверждать, что второе слагаемое формулы (7) в большей степени зависит от формы самого блока, в то время как второе слагаемое формулы (8) — от ошибок вычисления самих площадей. Естественно предположить, что вероятнейшее значение объема таково, при котором эти поправки равны. Следовательно, имея значения F' и F'' , получаем оптимальное расстояние между сечениями:

$$\sigma_x = \sqrt{12 \left| \frac{F'}{F''} \right|}. \quad (9)$$

Для блоков Акчий-Спасского карьера $F' = 0,26$, тогда $\sigma_x = 2,5$ м, т. е. при таком шаге не должна сказываться ошибка аппроксимации блока моделью. К аналогичным выводам приходят и другие авторы [6].

Уменьшить влияние методической ошибки можно, применив метод экстраполяции по Ричардсону [2]. В этом случае более достоверное значение объема можно вычислить по формуле

$$V = \frac{8V_1 - V_2}{7}, \quad (10)$$

где V_1 — значение объема для блока, расстояние между сечениями у которого принято σ_{x_1} . V_2 — значение объема того же блока, но в этом случае использованы только четные сечения, т. е. $\sigma_{x_2} = 2\sigma_{x_1}$.

Точность определения координат точек ЦМК повышается при аналитическом способе обработки фототеодолитных снимков.

Найдем средние квадратические ошибки координат точек ЦМК по формулам

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{B}{p^2} \sqrt{(x_L^2 + x_R^2) m^2 + x_L^2 p^2 \Delta_B^2}, \\ m_y &= \frac{B}{p^2} f \sqrt{2m^2 + p^2 (\Delta_B^2 + \Delta_f^2)}, \\ m_z &= \frac{B}{p^2} \sqrt{(2z_L^2 + 1) m^2 + z_L^2 p^2 \Delta_B^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где x_L, x_R, z_L — координаты точки левого и правого трансформированных снимков; m — средняя квадратическая ошибка трансформирования координат точек снимка; Δ_B — относительная ошибка измерения длины базиса фотографирования; Δ_f — относительная ошибка определения фокусного расстояния; B — длина базиса фотографирования; p — горизонтальный параллакс.

Трансформирование снимков осуществляют на основании вычисленных элементов ориентирования снимков, которые получают в процессе уравнивания. Следовательно, среднюю квадратическую ошибку координат трансформированного снимка можно получить из формулы полной дисперсии коррелированных величин, так как элементы внешнего ориентирования коррелируемы между собой:

$$m^2 = \sum m_i^2 + 2 \sum k_{ij} m_i m_j. \quad (12)$$

Здесь m_i — средние квадратические ошибки элементов ориентирования снимков; k_{ij} — коэффициенты корреляции соответствующих элементов.

Исследования многих авторов показали, что в процессе уравнивания элементов ориентирования снимков существуют три группы сильнокоррелируемых элементов при стандартном расположении опорных точек. Это угол скоса камеры и абсцисса передней узловой точки камеры ($\alpha - X_s$), угол наклона и аппликата ($\omega - Z_s$), фокусное расстояние и ордината ($f - Y_s$). Причем коэффициенты корреляции лежат в пределах [1]

$$-0,87 \leq k_{ij} \leq 0,99. \quad (13)$$

Принимая $m_\alpha = m_\omega = m_x = 10''$, $m_{X_s} = m_{Y_s} = m_{Z_s} = 0,002$ м, $m_f = 0,002$ м, $k_{\alpha X_s} = k_{\omega Z_s} = 0,9$, $k_{f Y_s} = 0,5$, окончательно имеем $m =$

= 0,002 мм. Тогда погрешность получения координат точек ЦМК составляет

$$m_K = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} = 0,31 \text{ м.} \quad (14)$$

При вычислении точности координат точек ЦМК по формулам (12) использованы значения $B=100$ м, $x_L=60$ мм, $z_L=50$ мм, $p=15$ мм, $f=200$ мм, $\Delta_B=1:10\,000$, $\Delta_f=1:100\,000$. В этом случае составляющая ошибки определения объема вынутой гор-

Сводная таблица вычисления объемов вынутой горной породы

Блок	Допустимые ошибки согласно инструкции, %	Традиционный способ		Предлагаемый способ			
		$\sigma_x=20$		$\sigma_x=5$		$\sigma_x=2,5$	
		V, тыс. м ³	ΔV , %	V, тыс. м ³	ΔV , %	V, тыс. м ³	ΔV , %
1	6,2	127,7	5,2	121,0	-0,3	121,4	0
2	8,1	73,9	2,4	73,9	2,4	72,2	0
3	10,0	26,1	-9,4	28,4	-1,4	28,8	0
4	10,0	23,1	-2,1	23,5	-0,4	23,6	0

ной породы, обусловленная точностью нахождения координат точек ЦМК для аналитического стереофотограмметрического метода, при наиболее точной аппроксимации реального блока моделью ($\sigma_x=2,5$ м) составит, согласно (4), $\Delta V_2=58,1$ м³. Методическая ошибка в этом случае по (2) $\Delta V_1=2,1$ м³. Следовательно, общая ошибка, рассчитанная для макетного блока, не должна превышать 0,1%.

На основании выполненных исследований в разрабатываемой АСМОК реализована программа вычисления объема вынутой горной породы, предполагающая использование точек ЦМК, полученных с точностью $m_K=0,4$ м, сечения блоков выполняются через 5 м. После вычисления объемов результаты уточняют методом экстраполяции по Ричардсону.

Предлагаемая методика апробирована на четырех реальных блоках Акчий-Спасского карьера. Результаты вычислений по традиционной методике и по предлагаемой сведены в таблицу. За «истинное» значение объемов вынутой горной породы приняты значения объемов, полученные при $\sigma_x=2,5$ м с последующим уточнением их по формуле Ричардсона.

Как видно из таблицы, традиционный способ определения объемов удовлетворяет современным требованиям инструкции [4]. Предлагаемый способ, использующий метод экстраполяции и более точно описывающий реальный блок, повышает точность определения объема почти в восемь раз. Составляющие суммарной ошибки на основании (2), (4) и (6) можно представить как составляющие от 1,1% при $\sigma_x=5$, $m=0,4$ для макетного блока

$$\Delta V = 16,9 + 150,0 + 493,1 = 660,0.$$

Оценим соотношение составляющих общей ошибки определения объема. Методическая ошибка 2,5 %, ошибка определения координат 22,5 %, ошибка аппроксимации 75 %, т. е. составляющая ошибка вычисления объема вынутой горной породы как при определениях традиционным, так и предлагаемым способами примерно одинакова в процентном отношении и составляет около 70% общей ошибки.

1. *Васильев Л. Н.* Об особенностях значений элементов ориентирования, получаемых из решения обратной фотограмметрической засечки // *Геодезия и картография*. 1977. № 8. С. 39—41. 2. *Демидович Б. П., Марон Л. А.* Основы вычислительной техники. М., 1970. 3. Инструкция по производству маркшейдерских работ. М., 1987. 4. Межотраслевая инструкция по определению и контролю добычи и вскрыши на карьерах. Л., 1977. 5. *Смирнов Е. И.* Анализ методов определения объемов вынутой горной породы // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1985. Вып. 42. С. 131—137. 6. *Финаревский И. И.* Построение маркшейдерских сетей методом аналитической фототриангуляции. М., 1987.

Статья поступила в редколлегию 16. 04. 88
