

УДК 622.3: 621.396.01: 519.24

П.В. Васильев

ОЦЕНКА ПОЛНОТЫ И КАЧЕСТВА ВЫЕМКИ РУДЫ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ

Геолого-технологическая модель месторождения описывается массивом регулярных блоков, аналогом трехмерного воксельного изображения или набора структурных карт сечений кондиционных рудных тел с включениями пустых пород. Изложен метод оценки ожидаемых показателей полноты и качества извлечения запасов рудного сырья на основе применения методов математической морфологии. В программном обеспечении морфометрического прогноза для определения потерь, засорения, разубоживания и степени раскрытия минералов на контактах руды (полезная фаза) и пустой породы (фондовый наполнитель) предложено использовать варьирование размеров структурных элементов, соответствующих объему селективности выемки добычного оборудования.

Ключевые слова: запасы руд, блочная модель, потери, математическая морфология.

В технологии добычи и переработки твердых полезных ископаемых эффективность работы горного предприятия напрямую зависит от полноты и качества извлекаемых запасов сырья. Методические указания [3] для месторождений рудного сырья с различной геометрией геологических тел (угол наклона, мощность, размеры добычного оборудования и т.п.) регламентируют такие соотношения эксплуатационных потерь и разубоживания (потери качества), которые минимизируют экономический ущерб. Исходя из действующих правил охраны недр, имеющихся технических возможностей и экономических критериев обосновываются нормативы планируемых потерь и засорения извлекаемого полезного ископаемого.

В свою очередь, при анализе изображений для определения формы и установления взаимосвязей между отдельными составляющими объектов используются методы математической морфологии [1]. Базовыми операция-

ми математической морфологии, основанной на теории случайных множеств и интегральной геометрии [2], являются: дилатация, при которой к объектам добавляется слой пикселей; и эрозия, как противоположность дилатации, при которой структурный элемент снимает слой пикселей с объектов. В 3D случае, когда модель представлена в виде массива двумерных изображений, расширение объектов при дилатации и сжатие при эрозии происходит послойно за счет соответствующего добавления или удаления вокселей (объемных аналогов пикселей). Варьирование размеров и формы структурных элементов, а также подбор числа итераций, позволяют найти оптимальную последовательность операций фильтрации исходного изображения в решении задач классификации и распознавания образов.

В работе устанавливается связь операций математической морфологии, используемых для фильтрации изображений, с технологическими опе-

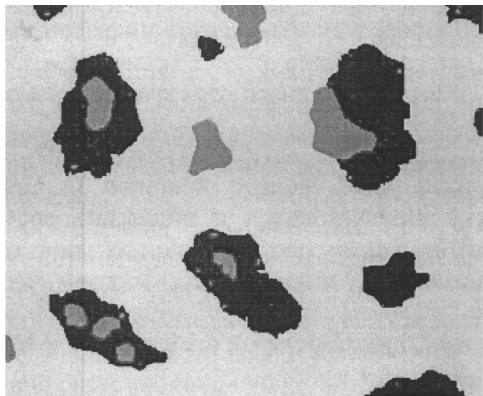


Рис. 1. Карта изображения сечения системы двухфазных частиц руды

рациями экскавации горной массы, приводящими к потерям и засорению полезного ископаемого. Рассматривается морфологический метод автоматической оценки количества и качества извлекаемого компонента на изображениях сечений дискретной модели геоструктуры, представленной двухфазной минеральной системой (рис. 1).

Рассмотрим дискретную модель геоструктуры месторождения. Пусть пространственная функция качества $G(x, y, z, c)$ распределения содержания ценного компонента c в блоках с координатами x, y, z получена с помощью интерполяции рассеянных точек данных опробования. Для ценной минеральной фазы V произвольного изображения U горизонтального сечения модели определим следующие операции математической морфологии [2]:

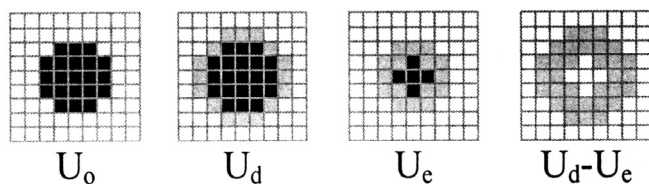


Рис. 2. Изображения сечения рудного тела:

U_0 — исходный объект; U_d — дилатация; U_e — эрозия; $U_d - U_e$ — общий слой эрозии и дилатации

Дилатация (Dilation) фазы V структурным элементом v :

$$V \oplus v = \{p \mid (v)_p \cap V\}. \quad (1)$$

Эрозия (Erosion) фазы V структурным элементом v :

$$V \ominus v = \{p \mid (v)_p \subset V\}. \quad (2)$$

Кроме того, Открытие (Opening) фазы V структурным элементом v последовательным применением операций эрозии и дилатации:

$$V \circ v = (V \ominus v) \oplus v. \quad (3)$$

Закрытие (Closing) фазы V структурным элементом v последовательным применением операций дилатации и эрозии:

$$V \oslash v = (V \oplus v) \ominus v. \quad (4)$$

Здесь \oplus и \ominus операции сложения и вычитания множеств по Минковскому; $(v)_p$ — трансляция структурного элемента v вектором p , т.е.

$$(v)_p = \{v + p \mid v \in \Xi\}, \forall p \in R^3. \quad (5)$$

Результаты применения операций дилатации и эрозии к отдельному объекту рудной фазы V (черный цвет) при размере структурного элемента $v=3 \times 3$ пикселя показаны на рис. 2.

На основании данных определений найдём массу компонента в зоне контакта «руда-порода». Для подсчета площади дилатации S_d или эрозии S_e необходимо выполнить операции логического вычитания отфильтрованных изображений и умножить полученное число пикселей в слое на их реальную площадь s в масштабе маркшейдерского плана горных работ, отображаемую отдельным пикселем:

$$\begin{aligned} S_d &= s (U_d - U_0); \\ S_e &= s (U_0 - U_e). \end{aligned} \quad (6)$$

Чтобы в общей массе Q полезной рудной фазы найти массу потерь компонента Q_d в слое дилатации в предположении о равновероятной выборке материала из зоны контакта, следует умножить площадь слоя на высоту h (расстояние между изображениями горизонтальных сечений воксельной модели):

$$Q_d = 0,5 h \bar{c} \cdot \bar{\rho} S_d = 0,5 h \bar{c} \cdot \bar{\rho} s \times \\ \times (U_d - U_0) = 0,5 h s \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}(x, y) \rho_{ij}(x, y), \quad (7)$$

где \bar{c} — среднее содержание полезного компонента; плотность материала ρ ; M, N — размеры изображения по x и y ; $c_{ij}(x, y)$ — содержания в буфере цвета; $\rho_{ij}(x, y)$ — плотность в буфере кадра; i, j — текущие индексы пикселя в изображении слоя дилатации.

Аналогичным образом определим массу засорения Q_e в слое эрозии.

При уменьшении размера структурного элемента или числа итераций зона эрозии и дилатации объектов сужается, что отражает реальное положение дел при ведении горных работ вдоль контактов «руда-порода».

На рис. 3, а показана зона эрозии и дилатации для рудной фазы V (черный цвет), представляющей чистую долю Q_V балансовой руды массой Q_B (черный и серый цвет). Пунктиром показаны границы зоны, материал которой массой Q_{VW} с некоторой долей вероятности $G(c)$ может попасть в экскавацию и стать частью суммарной добытой товарной руды $Q_D = Q_{VW} + Q_V$. На рис. 3, б показана соответствующая функция $G(c)$ вероятности извлечения полезного компонента в товарную руду при заданном размере структурного элемента в форме круга.

В предположении идеального разделения материала при минимальном

размере структурного элемента v в один пиксель функция извлечения $G(c)$ будет иметь ступенчатый вид с порогом в точке контакта. При этом потери и засорение станут равны нулю. Однако на практике обеспечить выемку материала точно по геологическим границам невозможно по многим причинам, в том числе из-за сложной морфологии тел, разлета и перемешивания кусков пород при взрыве, большого габарита добычного оборудования и т.д. В общем случае порционная выемка горной массы из зоны контакта в диапазоне расстояний $[-d, d]$ от границы может быть описана нормальным законом распределения вероятностей:

$$G(c) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{c_w}^{c_v} \exp\left(-\frac{(c - \bar{c})^2}{2\sigma^2}\right) dc, \quad (8)$$

где c — содержание компонента в бесконечно малой порции выемки; c_v — содержание компонента в балансовой руде; c_w — содержание компонента в забалансовой руде или пустой породе; \bar{c} — среднее содержание полезного компонента; σ^2 — дисперсия содержания.

Для морфологического анализа по интерполяционной модели используется дискретная форма функции Гаусса $G_k(c)$, $\forall k \in [1, \dots, K]$, где K — число классов качества, задаваемых концентрацией. В итоге интегральные показатели извлечения полезного компонента определяться по следующим формулам.

Потери полезного компонента или металла:

$$П = 1 - \frac{Q_d c_a}{Q_b c_b} \quad (9)$$

Потери качества в результате засорения (разубоживание):

$$P = \frac{c_a - c_b}{c_b} \quad (10)$$

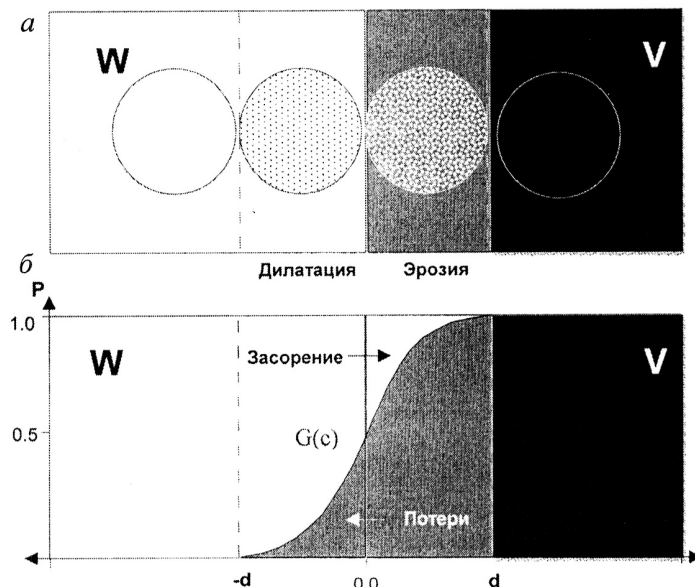


Рис. 3. Формирование качества сырья на контакте руда-порода при заданном размере d селективной выемки: a — область дилатации и область эрозии материала; b — функция извлечения $G(c)$ для нормального распределения вероятностей отбора

Засорение:

$$z = \frac{Q_p}{Q_d} \quad (10)$$

где c_a — содержание полезного компонента в погашенных балансовых запасах; c_b — содержание полезного компонента в добытом рудном сырье с учетом функции вероятности извлечения (7); Q_d — масса добытого сырья; Q_p — масса примешанной балансовой руды и пустой породы; Q_b — масса балансовой руды.

Получение рабочего изображения или растровой карты осуществляется для каждого горизонта путём дискретизации каркасной модели месторождения, представленной 3D диаграммой Вороного, с помощью быстрой интерполяции по методу естественных соседей [6]. Алгоритм морфологического подхода включает следующие основные шаги:

1. Ввод точек данных опробования и точки поверхности горной выработки

2. Построение каркасной модели с диаграммой Вороного точек опробования, объединение с полигональными поверхностями раздела сред, включая геологические границы и структурные нарушения.

3. Интерполяция значения содержаний проб в узлы регулярной решетки блочной модели или растровой карты по методу естественных соседей [330], вокселизация каркасной модели.

4. Применение вспомогательных морфологических операций открытия (3) и закрытия (4) с градиентной фильтрацией изображений для удаления малообъемных рудных тел (шум, не удовлетворяющий условиям).

5. Выполнение n итераций дилатации и эрозии полезной фазы V на дискретном изображении сечения i -го горизонта и заданного структурного элемента v до достижения необходимой ширины d полос потерь и засорения.

6. Применение операции логического вычитания изображения U_d , U_e из оригинального изображения сечения U для определения качества (в буфере цвета) и количества (числа точек растра) извлекаемой горной массы в зонах дилатации и эрозии.

7. Расчет по формулам (7)–(10) интегральных показателей извлечения руды и полезного компонента – потери (Π), засорение (\mathcal{Z}) и разубоживание (P).

8. Варьирование уровня бортового содержания полезного компонента s для изменения положения и конфигурации контакта «руда-порода» на изображении сечения

9. Сравнение оценки ожидаемых потерь Π с фактическими (измеренными прямым или косвенным методами в соответствии с нормативами) и оптимизация качества и полноты выхода товарной руды.

10. Переход к изображению U_{i+1} нового горизонтального сечения

11. Вывод результатов в целом по месторождению.

При расчете полноты извлечения, потерь и засорения на сечениях текущих рабочих горизонтов ведения горных работ, выходящих на поверхность уступов, данный подход предусматривает возможность подключения специальных методов математической морфологии, разработанных для распознавания размеров кусков породы взорванной горной массе в навалах [330]. Это требует использования изображений лазерного 3D сканирования, оцифрованных цветных снимков или стереофотограмметрии соответствующих участков.

Выполненная программная реализация предназначена для прогнозирования ожидаемых показателей и оптимизации извлечения на реальных моделях эксплуатируемых месторождений была разработана программа выполнения морфологических расчетов. Процедуры и классы методов математической морфологии на языке C++ имеются во многих библиотеках с открытым исходным кодом: GR32, Filters, OpenCV, CGAL и др. В настоящей работе использованы объекты TDilate и TErode библиотеки Graphics32 v.1.8.3 (www.gr32.org). Могут быть использованы функции фильтрации изображений библиотеки Filters (<http://filters.sourceforge.net/>) или Vampire для компилятора CodeGear C++Builder.

В диалоге задаются абсолютные размеры структурного элемента круговой формы, соответствующие объему экскаваторной выемки горной массы (SMU – Selective Mining Unit), и число итераций для достижения установленных кондиций. После выполнения операций Erode и Dilate в зонах контакта «порода-руда» вычисляются количество и качество материала в сечении дискретной модели месторождения. Затем определяются интегральные показатели ожидаемых показателей извлечения: потери, засорение и количество чистых фаз руды V и породы W . Далее рассчитываются относительные величины: коэффициент потерь, степень разубоживания и степень раскрытия полезного компонента. Наконец, варьируя бортовое содержание полезного компонента в кондиционной руде, а также путём смещения границы разделения порций выборки от линии контакта в сторону больших или меньших потерь (см. рис. 2, б) находят оптимальные показатели извлечения полезного компонента.

Несмотря на большое число необходимых итераций для многомасштабных геолого-технологических моделей месторождений расчет может выполняться в автоматическом режиме по макрокомандам сценария. В качестве графического ускорителя использована плата NVIDIA GeForce 260 GTX с возможностью распараллеливания вычислений по технологии CUDA или OpenCL.


Выводы

В работе описан новый метод автоматической оценки полноты и качества извлечения запасов полезного компонента при эксплуатации рудных месторождений с учетом потерь и разубоживания, основанный на операциях математической морфологии. Приведена схема расчета интегральных показателей извлечения, таких как ожидаемые потери, коэффициент засорения, разубоживания и степень

раскрытия ценной минеральной фазы, в зависимости от размера структурного элемента, объема селективной выборки и числа итераций дилатации и эрозии.

Предложен алгоритм оптимизации потерь и засорения путём варьирования уровня концентрации ценного компонента в руде, размера структурного элемента (единичного объёма селективности выемки) и расстояния между картами сечений — высоты горизонта или уступа при открытой добыче рудного сырья. В алгоритме расчета не учтены возможные потери отбитого ископаемого за пределами выработанного пространства, поэтому дальнейшее развитие данного подхода предполагает рассмотрение всех вариантов выемки и обобщение метода на случай многокомпонентного минерального сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. London: Academic Press, 1981. 280 p.
2. Матерон Ж. Случайные множества и интегральная геометрия. — М.: Мир. 1978.
3. Юматов Б.Н., Секисов Г.В., Буянов М.И. Нормирование и планирование полноты и качества выемки на карьерах. — М.: Недра. 1987.
4. Отраслевая инструкция по определению, нормированию и учету потерь и разубоживания руды и песков на рудниках и приисках Министерства Цветной металлургии СССР. — М.: 1975.
5. Thurley M., Andersson T. An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation. Minerals engineering, Vol. 21, No. 5, 2008, pp.405—415.
6. Sung W. Park, Lars Linsen, Oliver Kreylos, John D. Owens, Bernd Hamann. Discrete Sibson Interpolation. IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics, Vol. 12, No. 2, 2006. 

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Васильев П.В. — кандидат технических наук, рук. лаб. геоинформационных технологий, БелГУ, vassiliev@bsu.edu.ru

