

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ПОЛЕЗНОГО КОМПОНЕНТА ПРИ МОРФОЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГЕОСТРУКТУР

П.В. ВАСИЛЬЕВ

*Белгородский государственный
университет*

e-mail: vassiliev@bsu.edu.ru

В работе предложен метод повышения точности решения главной геодезической задачи и способ натурной проверки его работоспособности.

Ключевые слова: главная геодезическая задача, погрешность расчета длины дуги, эллиптический интеграл

Введение

При обработке и анализе изображений для определения формы и установления взаимосвязей между отдельными составляющими объектов используются методы математической морфологии [0]. Базовыми операциями математической морфологии, основанной на теории случайных множеств и интегральной геометрии [0], 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 свою очередь, в технологии добычи и переработки полезных ископаемых эффективность работы горного предприятия напрямую зависит от полноты и качества извлекаемых запасов сырья. Методические указания [0] для месторождений твердых полезных ископаемых с различной геометрией рудных 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, имеющих технические возможности и экономических критериев обосновываются нормативы планируемых потерь и засорения извлекаемого полезного ископаемого.

В данной работе устанавливается связь операций математической морфологии, используемых для фильтрации изображений, с технологическими операциями 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.

Метод решения

Рассмотрим дискретную модель геоструктуры $G(x,y,z,c)$, полученную с помощью интерполяции рассеянных точек данных опробования. Определим для фазы V произвольного изображения U горизонтального сечения модели следующие операции математической морфологии:

Дилатация (Dilation) фазы V структурным элементом v :

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

Эрозия (Erosion) фазы V структурным элементом v :

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

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:

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

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

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

На рис. 1 показаны результаты применения операций дилатации и эрозии к отдельному объекту рудной фазы V (черный цвет) при размере структурного элемента $v=3 \times 3$ пикселя.

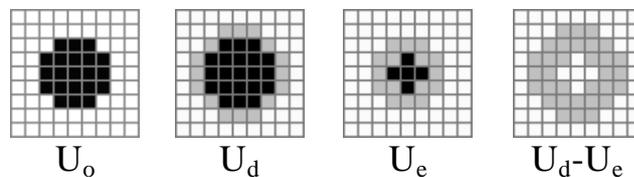


Рис. 1. Изображения сечения рудного тела: U_0 – исходный объект; U_d – дилатация; U_e – эрозия; $U_d - U_e$ – общий слой эрозии и дилатации

Определим массу компонента в зоне контакта. 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:

$$S_d = s (U_d - U_0); \quad S_e = s (U_0 - U_e). \quad (6)$$

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):

$$Q_d = 0.5 h \bar{c} \bar{\rho} S_d = 0.5 h \bar{c} \bar{\rho} s (U_d - U_0) = 0.5 h s \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}(x, y) \rho_{ij}(x, y), \quad (7)$$

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. 2(а) показана зона эрозии и дилатации для рудной фазы V (черный цвет), представляющей чистую долю QV балансовой руды массой QB (черный и серый цвет). Пунктиром показаны границы зоны, материал которой массой QVW с некоторой долей вероятности $G(c)$ может попасть в экскавацию и стать частью суммарной добытой товарной руды $QD = QVW + QV$. На рис. 2(б) показана соответствующая функция $G(c)$ вероятности извлечения полезного компонента в товарную руду при заданном размере структурного элемента в форме круга.

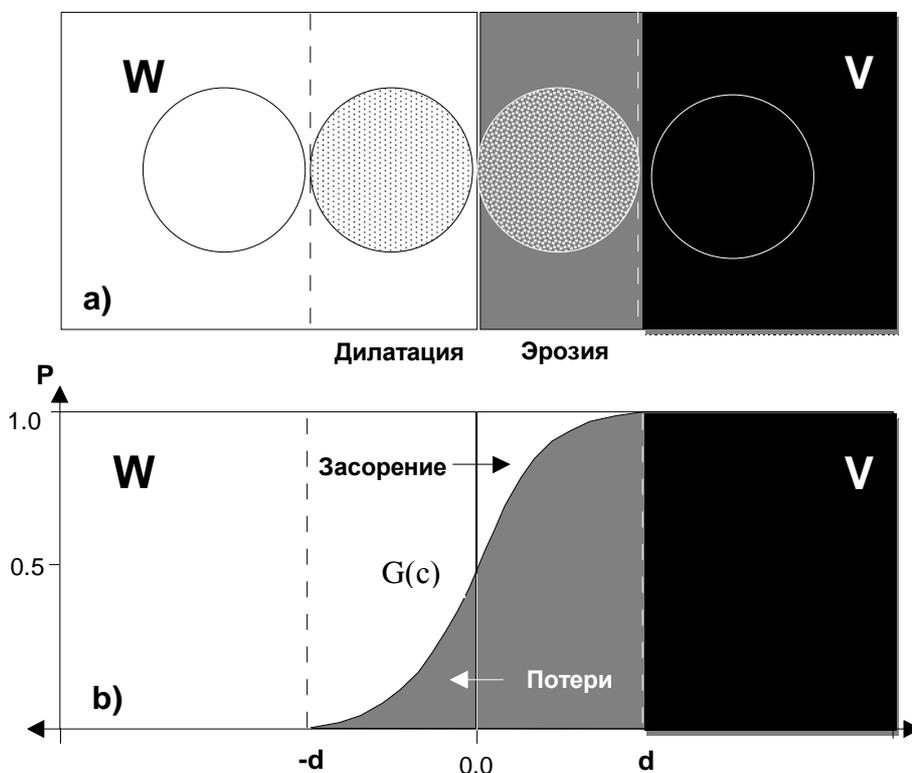


Рис. 2. Формирование качества сырья на контакте руда-порода при заданном размере d селективной выемки: а) область дилатации и эрозии материала; б) функция извлечения $G(c)$ для нормального распределения вероятностей отбора

В идеальном процессе разделении материала при минимальном размере структурного элемента υ в один пиксель функция извлечения $G(c)$ будет иметь ступенчатый вид с порогом в точке контакта. При этом потери и засорение будут 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:

$$G(c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{c_w}^{c_v} \exp\left(-\frac{(c-\bar{c})^2}{2\sigma^2}\right) dc \quad (7)$$

где c – содержание компонента в бесконечно малой порции выемки; c_w – 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:

$$П = 1 - \frac{Q_d c_a}{Q_B c_b} \quad (8)$$

Потери качества в результате засорения (разубоживание):

$$P = \frac{c_a - c_b}{c_b}$$

(9)

Засорение:

$$z = \frac{Q_F}{Q_D},$$

(10)

где $C_{\text{в}}$ – содержание полезного компонента в погашенных балансовых запасах; $C_{\text{д}}$ – содержание полезного компонента в добытом рудном сырье с учетом функции вероятности извлечения (7); Q_D – масса добытого сырья; Q_F – масса примешанной забалансовой 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 [0].

Алгоритм оценки потерь полезного компонента на основе морфологического подхода включает следующие основные шаги:

Ввести точки данных опробования и точки поверхности горной выработки

Построить каркасную модель с диаграммой Вороного точек опробования, объединенную с полигональными поверхностями раздела сред, геологических границ и структурных нарушений.

Интерполировать значения содержаний проб в узлы регулярной решетки блочной модели или растровой карты по методу естественных соседей [5], построив воксельный аналог каркасной модели.

Применить вспомогательные морфологические операции открытия (3) и закрытия (4) и градиентную фильтрацию изображений для удаления малообъемных рудных тел (не удовлетворяющих условиям).

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

Применить 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.

По формулам (8)-(10) рассчитать интегральные показатели извлечения руды и полезного компонента – потери (Π), засорение (Z) и разубоживание (P).

Варьировать уровень бортового содержания полезного компонента c для изменения положения и конфигурации контакта «руда-порода» на изображении сечения

Сравнить оценку ожидаемых потерь Π с фактическими (измеренными прямым или косвенным методами в соответствии с нормативами) и оптимизировать качество и количество выхода товарной руды.

Перейти к изображению U_{i+1} нового горизонтального сечения

Вывести результаты в целом по месторождению.

При расчете потерь и засорения на сечениях текущих рабочих горизонтов ведения горных работ, выходящих на поверхность уступов, методика предусматривает возможность подключения специальных методов математической морфологии, разработанных для распознавания размеров кусков породы взорванной горной массе в навалах [5]. Это предполагает использование изображений лазерного 3D сканирования, оцифрованных цветных снимков или стереофотограмметрии соответствующих участков.

Программная реализация

С целью 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) и функции фильтрации изображений библиотеки Filters (<http://filters.sourceforge.net/>) для компилятора CodeGear C++Builder.

В диалоге программы 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.b) находятся оптимальные показатели извлечения полезного компонента.

Несмотря на большое число шагов алгоритма расчет выполняется в автоматическом режиме по макрокомандам сценария. В качестве графического ускорителя использована плата NVIDIA GeForce 260 GTX.

Выводы

Разработан новый метод автоматической оценки потерь полезного компонента при эксплуатации рудных месторождений, основанный на операциях математической морфологии. Приведена схема расчета интегральных показателей извлечения (ожидаемых потерь, коэффициента засорения, разубоживания и степени 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. Не учитываются возможные потери отбитого ископаемого за пределами выработанного пространства. Метод обобщен на случай многокомпонентного минерального сырья.

Лителатура

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, 318 с.
3. Викторов А. С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006, 252 с.
4. Отраслевая инструкция по определению, нормированию и учету потерь и разубоживания руды и песков на рудниках и приисках Министерства Цветной Металлургии СССР. – М.: 1975г., 25 с.
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.

EVALUATION OF MINING LOSSES AND COMPONENT DILUTIONS WITH MORPHOLOGICAL IMAGE ANALYSIS OF GEOLOGICAL STRUCTURES

In this paper the discrete volumetric model for the mineral deposit is represented as a stack of images or raster maps of horizontal geological sections with different ore sorts.

P.V. VASSILIEV

Belgorod State University

e-mail: vassiliev@bsu.edu.ru

Key words: mathematical morphology, image analysis, structural element, modeling of deposits, discrete representation, field of concentration, mining recovery, erosion and dilation, losses and dilutions