

ОЦЕНКА ФУНКЦИИ РАСКРЫТИЯ ФАЗ МИНЕРАЛОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР РУД

П.В. Васильев¹⁾

¹⁾ Белгородский государственный университет, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, факультет КНИТ
e-mail: Vassiliev@bsu.edu.ru

Рассмотрены методы анализа изображений структур и текстур продуктов переработки руд. Предложена компьютерная методика автоматизации измерений спектров раскрытия и расчета фракционного состава измельченного материала. Отмечена необходимость стереологической коррекции данных при проведении электронно-микроскопических измерений на плоскости с целью реконструкции объемной функции распределения частиц по классам крупности и качества.

Ключевые слова: анализ изображений, структурно-текстурные характеристики, сканирующая электронная микроскопия, раскрытие минеральных фаз, прогноз технологических показателей, минералургия, недропользование, геоинформатика.

ВВЕДЕНИЕ

Прямые определения геометрического строения руд и гранулометрического состава измельченных материалов стали возможны в последнее время благодаря развитию рентгеновской микротомографии [1]. Однако пока данный метод не находит широкого применения по многим причинам: дороговизна оборудования, недостаточное пространственное разрешение на уровне десятка микрон, низкая контрастность по отношению к легким элементам, сложность вычислений. В связи с этим одним из наиболее перспективных методов изучения структур и текстур руд остаётся сканирующая электронная микроскопия (SEM) в сочетании с рентгенофлуоресцентным микроанализом (EDX) [5].

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ КУСКОВ РУД И РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ

Для того, чтобы извлечь ценную минеральную фазу из руды в горно-обогатительной технологии, применяется процесс сокращения крупности кусков сырья путём их механического разрушения с последующим выделением полезного компонента в концентрат. При решении задачи изучения влияющих на технологические свойства руд характеристик обычно рассматриваются два класса структур – монолитные и дисперсные. Монолитные структуры имеют трещиноватость природного или искусственного происхождения различной степени интенсивности. С другой стороны, измельченная масса частиц в тех или иных условиях образует агрегаты и пористые среды порой с весьма плотной упаковкой (как результат коагуляции тонких фракций). В этой связи оценка параметров монолитных и дисперсных структур обычно рассматривается с общих позиций стереологии как раздела стохастической геометрии [4].

Механизм разрушения многофазной руды сопровождается в той или иной степени случайным, не зависящим от кристаллографии и расположения зерен минералов, или селективным, идущим преимущественно по контактам зерен, раскрытием ценной минеральной фазы. Вследствие этого основной характеристикой дисперсной массы служит распределение фракций частиц по классам крупности и качества – $\gamma(v, g)$. Найдём, каким образом, зная матрицу спектра раскрытия ценной минеральной фазы $L(v, g)$ из результатов обработки электронно-микроскопических изображений, имея данные о гранулометрии материала на входе $f_{in}(v)$ и выходе $f_{out}(v)$ схемы сокращения крупности, а также задавая функцию вероятности извлечения различных классов частиц $\varepsilon_k(v, g)$ в концентрат, можно вычислить основные технологические показатели минералургического процесса – выход $\bar{\gamma}_k$, качество $\bar{\beta}_k$, извлечение $\bar{\varepsilon}_k$ ценной минеральной фазы в концентрат.



Для получения функции плотности распределения частиц по фракциям $\gamma(v, g)$ необходимо выполнить умножение матрицы спектра раскрытия на вектор гранулометрии продукта разрушения:

$$\vec{\gamma} = \vec{L} \cdot \vec{f}_{\text{от}} \quad (1)$$

В результате мы находим ожидаемый фракционный состав всей массы продукта разрушения $\gamma(v, g)$. Далее, используя накопление частиц в диапазоне крупности от 0 до v_{max} (число классов N) и качества от 0 до g_{max} (число классов M) вместо их физических свойств ξ , как это было предложено в [3], получим следующие формулы для прогнозирования интегральных показателей:

$$\bar{\gamma}_k = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \gamma_{ij}(v, g) \varepsilon_{ij}(v, g); \quad (2)$$

$$\bar{\beta}_k = \bar{\gamma}_k^{-1} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \gamma_{ij}(v, g) \beta_{ij}(v, g) \varepsilon_{ij}(v, g);$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\gamma}_k \bar{\beta}_k / \bar{\beta}_{\text{уч}},$$

где

$$\bar{\beta}_{\text{уч}} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \gamma_{ij}(v, g) \beta_{ij}(v, g) \varepsilon_{ij}(v, g) \quad (3)$$

Приведенные формулы дают возможность прогнозировать основные показатели всего технологического процесса рудоподготовки – от вскрытия месторождения до получения готового концентрата. Следует заметить, что для расчета конечных показателей по ценному компоненту (например, металлу в составе минеральной фазы) должен быть выполнен переход от минерального состава к химическому и от объёмных долей к массовым. Таким образом, основная трудность прогнозирования технологических показателей обогащения и повышения точности квалиметрии запасов месторождений заключается в том, чтобы определить спектр раскрытия ценной минеральной фазы $L(v, g)$ по данным анализа изображений ненарушенных исходных структур и текстур руд.

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАСКРЫТИЯ ФАЗ

При анализе изображений полированных сечений образцов руд измеренные функции распределения частиц по крупности и качеству (содержанию полезной минеральной фазы в сечениях проб) отличаются от фактических объёмных распределений. Частица может состоять из нескольких фаз, однако при прохождении сечения через одну лишь фазу она будет казаться мономинеральной или однофазной. Аналогично при равном эффективном размере или среднем диаметре частиц в сечении пробы наблюдается достаточно широкое распределение частиц по крупности, и, как следствие, гранулометрия определяется с ошибкой. Вследствие указанных эффектов степень раскрытия ценных зерен значительно переоценивается при выборе таких стереометрических способов измерений, как точечный, линейный или планиметрический.

Для учета погрешности применяется так называемая стереологическая коррекция. В ряде работ были предложены различные методы коррекции этой ошибки [5]. Существуют два метода стереологической коррекции для бинарных минералогических систем: метод локализации и метод ядра трансформации. Было обнаружено, что процедура коррекции на основе ядра трансформации обеспечивает более точные и детальные результаты при исследовании окисленных железных руд.

При анализе изображений полированных сечений образцов руд измеренные функции распределения частиц по крупности и качеству (содержанию полезной минеральной фазы в сечениях проб) отличаются от фактических объёмных распределений. Частица может состоять из нескольких фаз, однако при прохождении сечения через одну лишь фа-



зу она будет казаться мономинеральной или однофазной. Аналогично при одинаковом размере или среднем эффективном диаметре частиц в сечении пробы наблюдается достаточно широкое распределение частиц по крупности, и гранулометрия определяется с ошибкой. Погрешность оценки фракций частиц по составу всегда переоценивает степень раскрытия по количеству и зависит от таких факторов, как способ измерения (точечный, линейный или планиметрический), форма частиц и степень вкрапленности.

Для учета погрешности применяется так называемая стереологическая коррекция. Среди известных методов стереологической коррекции для бинарных систем распространены два метода: процедура локализации и ядра трансформации. Коррекция на основе ядра трансформации обеспечивает более точные прогнозы, однако она более сложна в вычислительном плане при оценке фактических параметров раскрытия узких размерных классов частиц. Эти методы реализованы в программном обеспечении анализатора раскрытия минералов MLA (Центр JKTech, Университет г. Брисбан, Австралия), поставляемого компанией FEI для сканирующих электронных микроскопов серии Quanta. Возможности MLA по анализу рассеянных на классы крупности измельченных проб руд с учетом стереологической коррекции описаны в работе [5].

В настоящей работе предложено измерять не сами распределения материала по составу сростков в различных классах ситового отсева, как это предлагается по инструкции MLA, а спектры раскрытия минеральных фаз $L(v, g)$ в исходных аншлифах или крупнодробленых кусках проб руды. Для этого исходная керновая проба дробится и выделяется класс с размером частиц в 5-10 мм. Масса пробы должна обеспечивать представительность для изучаемого сорта руды. Далее, после стандартной предварительной обработки полученных изображений осуществляется анализ сечений многофазных частиц по разработанному алгоритму фрагментации.

На рис.1 приведена иллюстрация процесса фрагментации микроструктуры двухфазной руды.

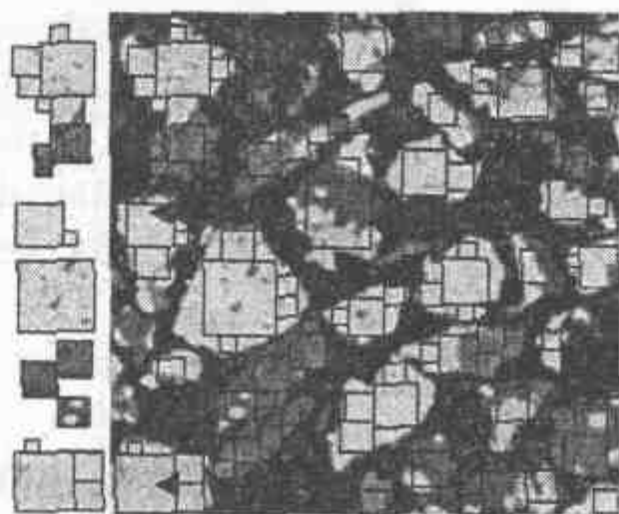


Рис. 1. Изображение микроструктуры двухфазной руды с фрагментами раскрытия полезного минерала и пустой породы

В левой части показаны извлеченные фрагменты нескольких размерных классов. Методика предполагает, что граничная рамка квадратного фрагмента не должна пересекаться с границами частиц, пиксели которых помечены соответствующим идентификатором. В каждом классе крупности предполагаемых кубических частиц все квадратные фрагменты, которые пересекаются с контактами частиц и пластмассовым наполнителем, автоматически отбрасываются. В подсчет идут только правильные квадратные фрагменты, не попадающие на матрицу затвердевшей пластмассы (тёмная фаза). Разработанное программное обеспечение выполняет построение квадродерева фрагментов раскрытия выбранной фазы (попарно) по участкам сечений частиц, как это проиллюстрировано на рис.1. Программа анализа последовательно выполняет переход от максимально возможных по крупности фрагментов вплоть до детального разрешения изображения по каждому отдельному пикселю. При наборе статистики по большому числу полей полированных шлифов накапливаются данные для каждого класса качества и крупности фрагментов раскрытия монолитной структуры, и после нормировки определяются искомые спектры раскрытия $L(v, g)$. Результаты представляются гистограммой, показанной на рис. 2.

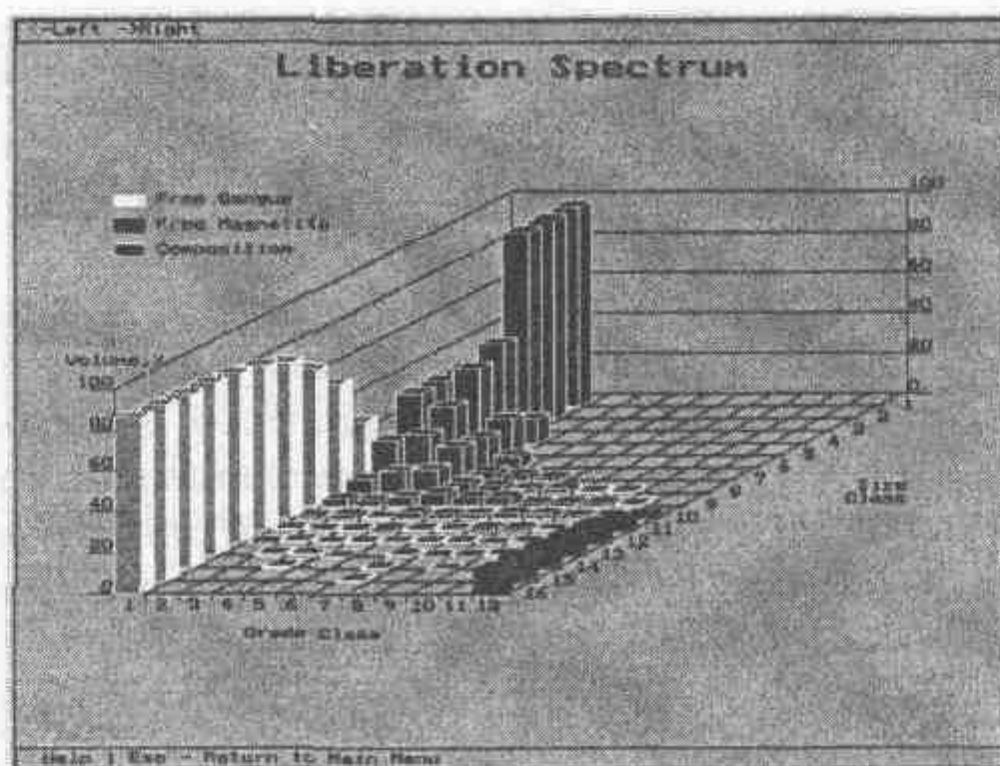


Рис. 2. Гистограмма спектра раскрытия двухфазной руды, полученная с помощью программы MINLIBER

Полученные спектры раскрытия используются в последующих расчетах функции распределения частиц по крупности и качеству $\gamma(v, g)$. Таким образом, в результате анализа предлагается следующая последовательность оценки функции раскрытия минеральных фаз руды $\gamma(v, g)$ при ее разрушении.

Этап 1. Получение первичных изображений сечений проб во вторичных электронах в сканирующем электронном микроскопе (Quanta 3D, FEI):

- обработка изображений: фильтрация, сегментация, деагрегация, применение способов математической морфологии, таких как эрозия и дилатация;
- анализ изображений: выделение полезных фаз, поиск редких включений, измерение распределений по диаметрам сечений;
- экспорт изображений в стандартные форматы [**.jpeg*], [**.gif*], [**.tiff*].

Этап 2. Прогнозирование раскрытия минеральных фаз в программе MINLIBER:

- импорт изображений полированных проб, полученных с помощью электронной микроскопии;
- определение спектральных функций раскрытия минеральных фаз $L(v, g)$, включая ценную минеральную фазу;
- задание granulometрии продуктов разрушения и сепарационной характеристики оборудования;
- расчет функции плотности распределения частиц по крупности и качеству $\gamma(v, g)$ по формуле (1);
- прогноз интегральных показателей процесса обогащения (выхода концентрата $\bar{\gamma}_k$, качества концентрата $\bar{\beta}_k$ и извлечения $\bar{\varepsilon}_k$ ценной минеральной фазы в концентрат) по формулам (2);

– экспорт результатов в форматы наиболее распространенных горно-геологических информационных систем, таких как Datamine Studio, Micromine, Gemcom, Surpac, FracSIS.

Этап 3. Результаты импортируются в геоинформационную систему, горно-геологическую:

- строится цифровая модель месторождения блочно-каркасного типа, отражающая фактические и потенциальные минералургические показатели в массиве;
- выполняется пересчет запасов полезного компонента с учетом возможных потерь и разубоживания, и выполняется оптимизация контуров открытой отработки с целью максимизации получаемой прибыли от реализации продуктов на рынке.

Схематически последовательность операций методики определения функции раскрытия минеральных фаз рудного сырья для компьютерного моделирования и минералургического картирования месторождений представлена на рис. 3.

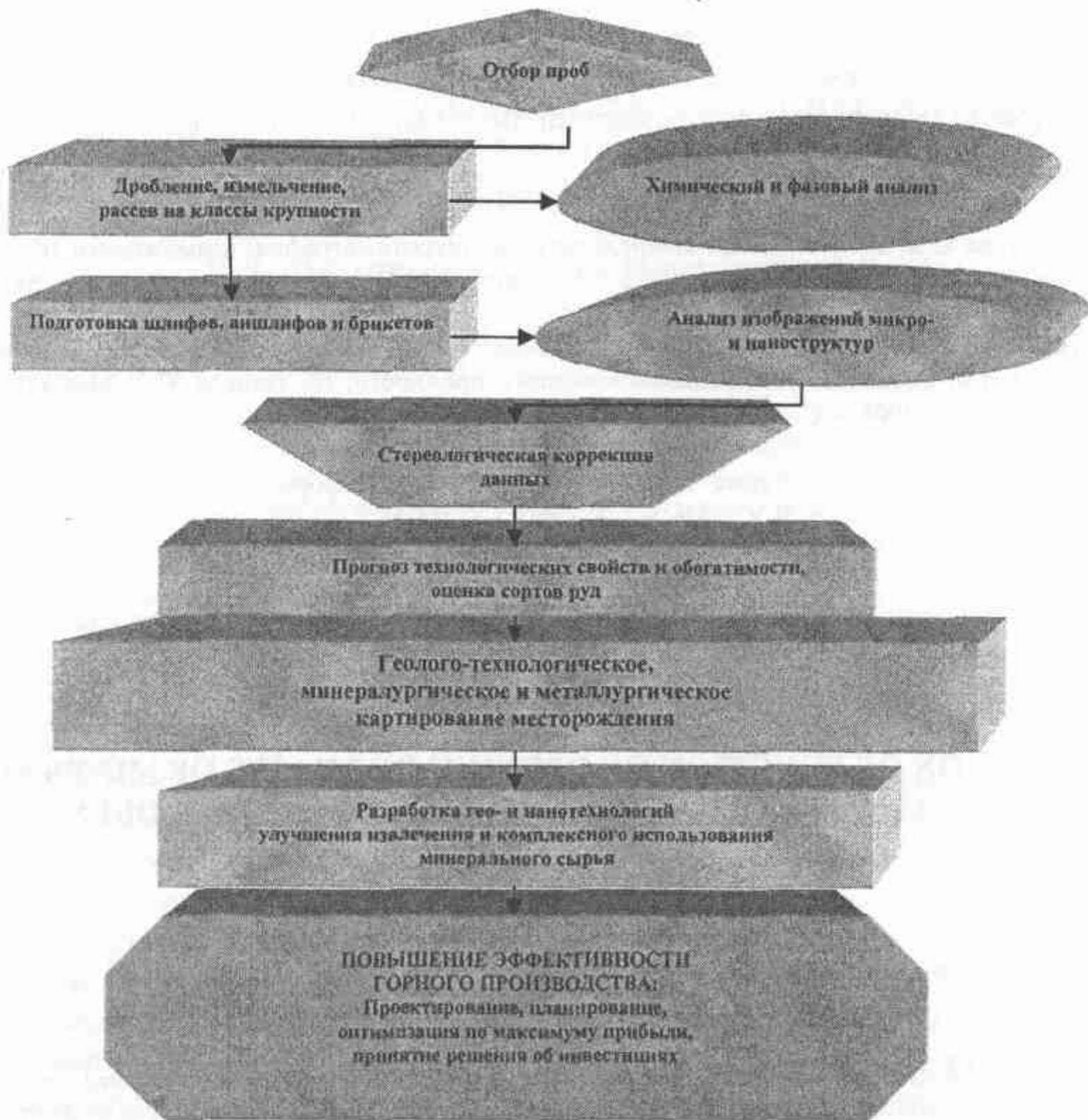


Рис. 3. Схема компьютерной технологии минералургического картирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена компьютерная методика стереологической оценки раскрываемости минералов при разрушении руд для решения задачи прогнозирования технологических показателей переработки, включающая:

- анализ электронно-микроскопических изображений полированных сечений брикетов тонких фракций частиц, помещенных в матрицу из эпоксидной смолы. Определение статистически достоверных планиметрических характеристик геометрического строения образцов для воспроизводящей площадки измерений;
- расчет ожидаемых интегральных показателей с помощью разработанного программного обеспечения моделирования раскрытия минералов при разрушении руд MINLIBER;
- применение реконструированных объемных функций распределения частиц по фракциям для расчета ожидаемых интегральных технологических показателей при сепарации рудных материалов по минеральному составу частиц и сростков.

В разработанной версии программы MINLIBER используется случайная модель стохастического разрушения и раскрытия зерен минералов. Для расширенной версии программы разрабатывается модуль расчета эффекта селективного разрушения руды по границам срастания минеральных фаз и плоскостям спайности кристаллов.

Данные оценки минералургических свойств руд предназначены для формирования геолого-технологических баз данных детальной разведки и эксплуатационного опробова-



ния рудных залежей. Прогнозирование закономерностей раскрытия извлекаемых фаз позволяет оценивать ожидаемые показатели схем переработки руд и создавать более точные геоинформационные модели месторождений полезных ископаемых для подсчета промышленных запасов.

Литература

1. Якушина О.Я. Рентгеновская вычислительная микротомография: возможности метода при исследовании минерального сырья / О.Я. Якушина // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2004. – № 4. – С. 21-34.
2. Васильев П.В. Стохастическое моделирование раскрытия фаз поликристаллических материалов при разрушении / П.В. Васильев // Актуальные проблемы прочности: сб. тезисов XLV Междунар. конф. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. – С. 71-72.
3. Васильев П.В. Некоторые стохастические модели и алгоритмы квалиметрии запасов минерального сырья / П.В. Васильев // Научные ведомости БелГУ. Сер. Информатика. Прикладная математика. Управление. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. – Т.1. – №3. – С. 45-53.
4. Hilliard J.E., Lawson L.R. Stereology and Stochastic Geometry (Computational Imaging and Vision). Springer, 2003. – 512 p.
5. Burrows Debra, Fandrich Rolf and Gu Ying. Automated Mineralogy for Ore Characterisation and Plant Optimisation. Automated Mineralogy 2007. Brisbane. Australia.

ESTIMATION OF FUNCTION OF OPENING OF PHASES OF MINERALS AT ANALYSIS OF IMAGES OF MICROSTRUCTURES ORES

P.V. Vasilyev¹⁾

¹⁾ Belgorod state university, 308015, Belgorod, street of Victory, 85, faculty of CS&T

The methods of analysis of images of structures and текстур products of processing are considered ores. The computer method of automation of measurements of spectrums of opening and calculation of factious composition of the ground up material is offered. The necessity of stereological correction of information is marked during the leadthrough of the electronic-microscopic measurings on a plane with the purpose of reconstruction of by volume function of distributing of particles on the classes of largeness and quality.

Keywords: analysis of images, sweepable electronic microscopy, opening of mineral phases, prognosis of technological indexes, geoinformatic.