

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 — 1972

УДК 539.25; 519.95 :

Н. Ф. АФАНАСЬЕВ, Р. А. БОЧКО, А. А. ЧИГИРЕВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА МИКРООБЪЕКТОВ ПО ИХ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В статье описывается система и алгоритм для решения задачи определения статистических распределений размеров микрообъектов, их средних значений и дисперсий по фотоизображениям объектов, полученным на растровом электронном микроскопе. Отмечаются возможные области применения этой системы. Представлены результаты анализа пористости тонкодисперсных тел.

Известен ряд разработок [4], используемых для автоматизации исследования структур по шлифам горных пород. Эти системы основаны на применении микроскопов оптического диапазона увеличений и не пригодны при изучении объектов особо тонкой структуры. Изображения, полученные на электронном микроскопе, не могут быть обработаны на существующих устройствах упомянутого типа из-за следующих недостатков: требование высокого контраста между микрообъектом и фоном, постоянством уровня дискриминации и произвольности его оценки оператором, ограниченного диапазона измеряемых величин и невозможности получения статистик по изображениям образца, полученным при различных увеличениях.

В данной статье описывается система и излагается математический аппарат для решения задачи определения распределений размеров средних значений и дисперсий микрообъектов горных пород, фотоизображения которых получены на растровом электронном микроскопе при различных увеличениях. Устранение отмеченных недостатков упомянутых систем в описываемой системе достигнуто за счет определения уровня дискриминации по методу скользящего сглаживания сигнала на интервале T , за счет высокой чувствительности измерительной части системы, позволяющей представлять информацию в цифровом коде, а также применения в качестве преобразователя информации цифровой вычислительной машины.

В алгоритм задачи по определению распределений размеров, средних значений и дисперсий микрообъектов, реализованный в системе, входит преобразование плотностей точек фотоизображения микрообъекта в электрические сигналы временного аргумента; дискриминация, квантование и кодирование сигналов в коде применяемой вычислительной машины; вычисление текущих уровней дискриминации; определе-

ние длительности пребывания сигнала над уровнем дискриминации в одинаковые моменты времени; классификация длительностей пребывания сигнала за уровнем дискриминации по интервалам; подсчет числа выбросов в каждом интервале и общего числа выбросов; вычисление распределений размеров микрообъектов по изображениям одного увеличения; вычисление распределений размеров микрообъектов по изображениям, полученным при различных увеличениях; вычисление

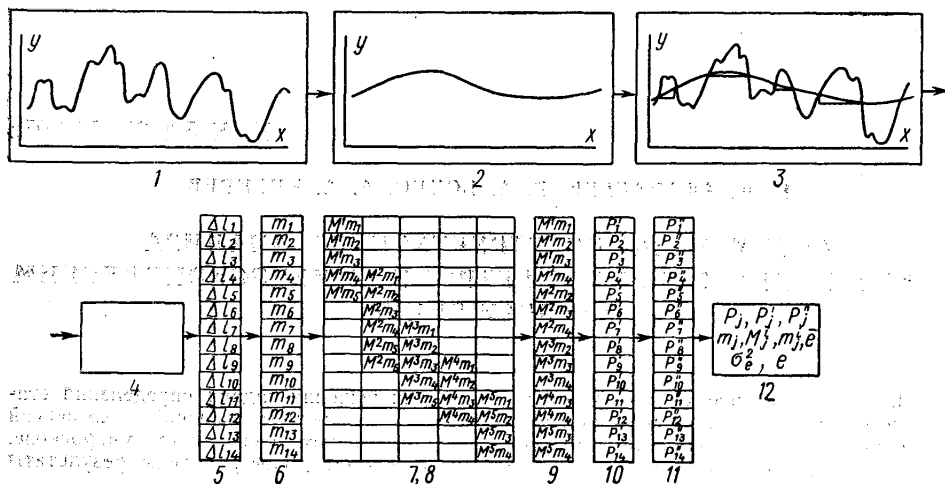


Рис. 1. Иллюстративная схема решения задачи

среднего размера микрообъектов; вычисление дисперсии размеров микрообъектов и печать результатов.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1. Приведенный алгоритм решения задачи реализуется системой (рис. 2), которая содержит блок сканирования 1, 2, 8, осуществляющий преобразование почернения негатива в аналоговый электрический сигнал, зависящий от временного аргумента, цифровую вычислительную машину 3 (ЦВМ), выполняющую математическую обработку видеосигналов и логические операции и снабженную устройством связи 4, осуществляющим преобразование аналогового сигнала в цифровые коды, с которыми работает ЦВМ; устройство вывода 5 результатов в форме, пригодной для последующего анализа. В качестве сканирующего устройства используется микрофотометр МФ-2 [1], в котором селеновый фотоэлемент заменен фотоэлектронным умножителем ФЭУ-18, а для перемещения каретки, несущей изображение, используется шаговый двигатель ШД, обеспечивающий высокую стабильность скорости сканирования (0,05%). Устройство управления ШД выдает также синхрипульсы для управления работой машины. Основными преимуществами оптикомеханического сканирования изображений с помощью микрофотометра в сравнении с другими способами развертки являются высокая разрешающая способность и высокая точность измерений сигнала, что позволяет значительно снизить требования к контрасту анализируемых изображений.

Роль устройства обработки информации, поступающей от микрофотометра, выполняет вычислительная машина УНШН («Днепр»), относящаяся к классу управляющих машин. Для двухсторонней связи

с объектами машина снабжена дополнительными блоками, которые воспринимают информацию о состоянии объекта и преобразуют ее в форму, пригодную для восприятия машиной. При решении данной задачи также используется устройство связи с объектом (УСО), которое преобразует напряжение постоянного тока, поступающее с выхода блока сканирования в десятиразрядный двоичный код [3]. Блок-схема преобразователя напряжения в цифровой код представлена на рис. 3. В качестве устройства вывода результатов используется печатающее устройство машины.

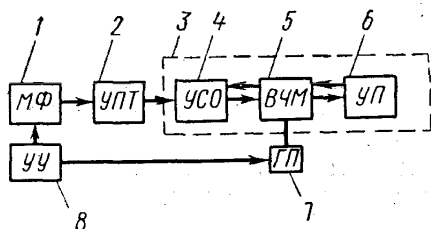


Рис. 2. Блок-схема системы: 1 — микрофотометр МФ-2, 2 — усилитель постоянного тока, 3 — вычислительная машина «Днепр», 4 — устройство связи машины с объектом, 5 — вычислительная часть машины, 6 — устройство печати, 7 — генератор импульсов, 8 — устройство управления шаговым двигателем

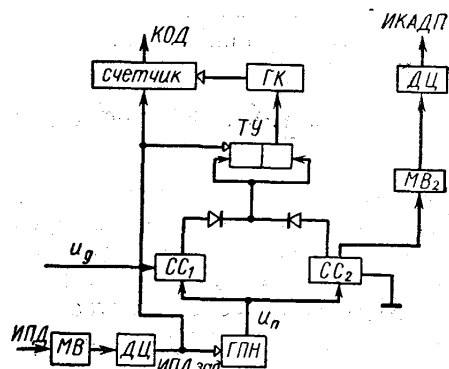


Рис. 3. Блок-схема преобразователя «напряжение—код». ИПД — импульс приема с датчиков, ДЦ — линия задержки, ГПН — генератор пилообразного напряжения, CC_1 и CC_2 — схемы сравнения пилообразного напряжения U_n с кодируемым напряжением U_g и с потенциалом земли соответственно, ТУ — триггер управления, ГК — генератор кодирующих импульсов, ИКАДП — импульсы конца преобразования

Рассмотрим обоснование преобразования сигнала, которое выполняет система при реализации алгоритма решения данной задачи.

Сканирование изображений и преобразование сигналов развертки в код вычислительной машины осуществляется блоком сканирования, включающим микрофотометр, усилитель постоянного тока УПТ и преобразователь «напряжение — код». В процессе сканирования световой поток осветительной системы микрофотометра, модулируемый перемещающимся изображением, преобразуется фотоэлектронным умножителем в электрический сигнал, который усиливается УПТ и поступает на преобразователь «напряжение — код», опрашиваемый по команде из устройства управления ЦВМ. Получаемые в процессе преобразования коды чисел поступают в оперативную память машины.

Определение уровня дискриминации. Размеры элемента фотоизображения соответствуют расстоянию между точками перегиба пограничных кривых, совпадающими со средним уровнем видеосигнала, поэтому измерения геометрических элементов изображений выполняются на среднем уровне сигнала. В большинстве случаев фотоизображения, полученные на электронном микроскопе, имеют непостоянный средний ток, поэтому за уровень дискриминации при обработке таких изображений принято текущее среднее, определяемое скольжением сглаживанием сигнала на интервале T . Оператор текущего среднего реализуется ЦВМ в соответствии с выражением

$$S_y(x) = \frac{1}{n} \sum_i^{i+n} y_i(T_0) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \dots N \\ n = 1, 2, 3 \dots 60, \end{matrix} \quad (1)$$

где n — число дискретных значений сигнала, участвующих в осреднении; $y_i(T_0)$ — значения ординат сигнала; T_0 — интервал дискретизации сигнала.

Оптимальный интервал сглаживания $T (T = T_0 n)$ оценивается из следующего уравнения [2]:

$$\frac{2}{T} \int_0^T R_c(\tau) d\tau - 2R_c(T) - \frac{1}{T^2} \int_0^{2T} (T - \tau) R_{(c+m)}(\tau) d\tau = 0, \quad (2)$$

где $R_c(\tau)$ — корреляционная функция сглаженной реализации; $R_{(c+m)}(\tau)$ — корреляционная функция исходной реализации. При определении скользящего среднего начальный и конечный участки реализации длиной $T/2$ из анализа исключаются.

Сравнение сигнала со средним уровнем осуществляется формированием разности сигнала и текущего среднего

$$\Delta y = y_i + \frac{n}{2} (T_0) - \frac{1}{n} \sum_i^{i+n} Y_i(T_0) \quad (3)$$

и анализом знака полученной разности.

Длительность пребывания сигнала выше уровня дискриминации оценивается по разности абсцисс точек пересечения сигнала при входе и выходе сигнала за уровень, т. е. при выполнении условий

$$y(x_1) = y_T(\overline{x_1}), \quad y(x_2) = \overline{y(x_2)}.$$

При анализе дискретных значений сигнала условия пересечений сигналом уровня дискриминации будут следующими:

$$y(x_1) \geq y_T(\overline{x_1}), \quad y(x_2) \geq \overline{y_T(x_2)}, \quad (4)$$

а значение длительности l равно

$$l = n_j' T_0, \quad (5)$$

где n_j' — число дискретных значений сигнала в j -том выбросе равных или больших значений среднего уровня.

Оценка условий (4) заменена определением знака разности (3) $\text{sing}_+[\Delta y]$, поэтому n_j' в формуле (5) означает число sing_+ за время одного выброса.

Вычисление распределений размеров элементов по изображениям, полученным при одном увеличении, выполняется по формуле

$$P_j = \frac{m_j}{N} \quad j = 1, 2 \dots k, \quad (6)$$

где m_j — число длительностей в j -том интервале; $N = \sum_{j=1}^k m_j$ — число дискретных выбросов сигнала за уровень на всей реализации; j — номер интервала; k — число интервалов.

При построении статистических распределений интервалы группировки измеряемых величин обычно принимают равными или оценивают

по виду распределения. Дифференциальные распределения геометрических элементов микрообъектов пористых тел являются приблизительно логарифмически нормальными, поэтому интервалы группировки измерений выбраны изменяющимися по логарифмическому закону. Это позволяет более детально исследовать распределения у максимума и исключить излишнюю подробность исследования правой его ветви. Программа обработки предусматривает формирование 14 интервалов, охватывающих детали, различающиеся до четырех порядков. Подсчет числа длительностей в интервалах выполняется сравнением значений с границами интервалов и прибавлением единицы в счетчик интервала, если такое сравнение происходит. Для устранения ошибочных измерений на краях реализации первый и последний выбросы исключаются.

Вычисление распределений по изображениям различных масштабов сводится к увязке результатов, полученных при вычислении частичных распределений (по одному масштабу). В ряде случаев размер деталей на исследуемом образце может изменяться до четырех и более порядков, поэтому их изображения получают при различных увеличениях электронного микроскопа (например, от $100\times$ до $100\,000\times$). В зависимости от увеличения M микроскопа длина реализации на образце L_M определяется из выражения $L_M = \frac{L}{M}$, где L — длина реализации на изображении.

Очевидно при различных увеличениях L будет различной. Если частичные распределения строят по реализациям равной относительно образца длины на каждом масштабе, то число реализаций, возрастающее пропорционально увеличению микроскопа, оказывается очень большим, а общий объем измерений превосходит необходимый. Например, если изображение, полученное при увеличении $100\times$, сканировать по одному профилю, то изображение, полученное при увеличении $100\,000\times$, необходимо сканировать по тысяче профилей. Уменьшение длины реализации на мелкомасштабных изображениях недопустимо, так как при этом возрастает погрешность оценки вероятностей крупных деталей. Если же потребовать равенства ошибок вычисления частичных распределений, то число профилей на изображениях, полученных при различных увеличениях, следует брать одинаковым, но тогда число элементов m_j в интервалах надо брать с весом, равным или пропорциональным увеличению микроскопа. Такой прием может приводить к значительным погрешностям части распределения, полученной по крупномасштабным изображениям, при изучении существенно анизотропных структур. Однако эти ошибки могут быть снижены правильной оценкой минимального числа профилей.

Распределение элементов изучаемого образца в этом случае вычисляется по формуле

$$\rho_j = \frac{M_j^i m_j^i}{\sum_{j=1}^k M_j^i m_j^i}. \quad (7)$$

Значения $M_j^i m_j^i$, представляющие собой максимальное взвешенное число элементов в интервале j , выбираются среди всех масштабов M^i . Вычисление распределений по формуле (7) обеспечивает увязку частичных распределений, выполнение которых необходимо для устранения

их перекрывающихся частей. Плотность распределения p_j'' , среднее значение детали \bar{l} и дисперсия σ_l^2 по известным p_j' и Δl_j вычисляются по формулам

$$p_j'' = \frac{p_j'}{\Delta l_j},$$

$$l = \sum \bar{l}_j p_j',$$

$$\sigma_l^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^k (\bar{l}_j - \bar{l})^2 p_j',$$

где Δl_j — величина интервала группировки измерений; \bar{l}_j — середина интервала группировки.

Рассмотренная методика анализа фотоизображений была применена для исследования структуры порового пространства тонкодисперсных сред. Анализ проводился по фотоизображениям естественного скола образца, полученным с помощью растрового электронного микроскопа jSM-2 (фирма «Джеол», Япония). На каждом образце выполнялась съемка трех участков. Каждый кадр изображения любого масштаба сканировался по шести профилям, поэтому общий объем выборки на трех участках равнялся примерно 2000 измерений (хорд порового пространства). Результаты обработки представлены графически на рис. 4 в виде плотностей распределений размеров пор в интервале от 0,02 до 40 мкм.

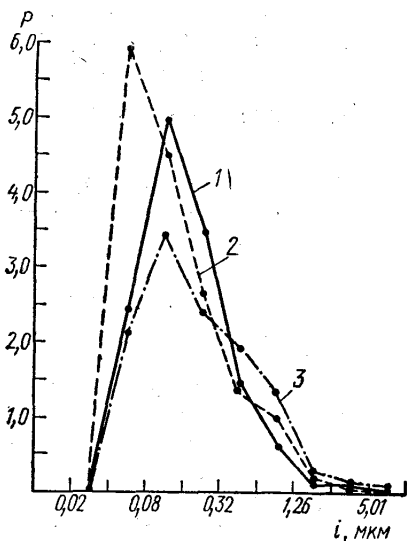


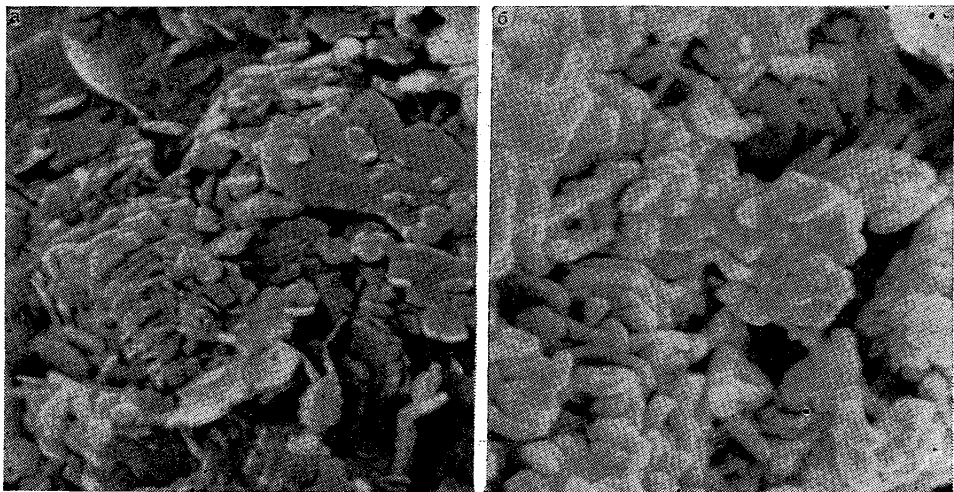
Рис. 4. Примеры распределения размеров пор в тонкодисперсных телах: 1 — силикагель, 2 — каолиновая глина Присяновского месторождения, 3 — каолиновая глина Владимирского месторождения

Кривая распределения размеров пор (РРП) силикагеля имеет ярко выраженный максимум в интервале 800—1600 Å и малую дисперсию. По данным адсорбции¹ структура порового пространства этого образца характеризуется значительной однородностью с преобладающим эффективным диаметром пор, равным 885 Å, что свидетельствует о хорошей сравнимости результатов этих двух методов.

На том же рисунке приведены кривые распределения размеров пор глин каолинового состава Присяновского и Владимирского месторождений Украинской ССР. Каолиновые глины Присяновского месторождения являются первичными, сохранившими структуру материнской породы, что обусловило плотнейшую упаковку частиц глинистых минералов (прилегание по базальным поверхностям, рис. 5, а) и значительную однородность порового пространства с явным преобладанием размеров пор в интервале 0,04—0,08 мкм.

¹ Образец силикагеля и определенные методом адсорбции эффективные диаметры пор этого образца любезно предоставлены нам сотрудником химического факультета МГУ Ю. С. Никитиным.

Каолиновые глины Владимирского месторождения являются вторичными, образовавшимися при переотложении первичных каолиновых залежей. Расположение частиц каолинита характеризуется меньшей упорядоченностью (рис. 5, б), чем в предыдущем случае, результатом



а

б

Рис. 5. Микрофотографии поверхности скола каолиновых глин Просянковского (а) и Владимирского (б) месторождений. (Увеличение 10 000^х.)

чего являются меньшие значения плотности распределения размеров пор и большая дисперсия.

В заключение отметим следующее.

Принятый алгоритм обработки фотоизображений позволяет получать распределения геометрических элементов исследуемых образцов, имеющих неравномерную яркость. Фильтрация низкой частоты разверток изображений осуществляется программным путем, что обеспечивает возможность анализа практически любых электронно-микроскопических изображений.

Средняя квадратическая ошибка измерений сигнала, равная $\sigma_D = 0,02$, позволяет выделять детали, имеющие малый контраст с фоном.

Программа выполнений предусматривает обработку пяти разномасштабных изображений при сканировании их по шести профилям.

Результаты обработки могут быть представлены в виде распределений числа пор по интервалам частот и плотностей распределений.

Задание интервалов группировки измерений, изменяющихся по логарифмическому закону, обеспечивает исследование элементов объекта, размеры которых изменяются в пределах до 4 порядков.

Обработка электронно-микроскопических изображений тонкодисперсных тел позволила установить, что плотности распределения размеров пор в интервале 0,02—40 мкм являются асимметричными с максимумом в области малых размеров и что параметры РРП глин при равной их дисперсности зависят от плотности упаковки частиц, слагающих породу, которая в свою очередь является результатом ее генезиса.

Сравнение РРП, полученного методом автоматической обработки фотоизображений, со значениями эффективных диаметров пор, полу-

ченных методом адсорбции, свидетельствует о близких значениях данных, полученных этими методами.

Рассмотренная система анализа может быть использована для изучения информации, зарегистрированной фотографическим способом на прозрачной основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М., «Недра», 1968.
2. Великин С. Я. Статистические методы исследования систем автоматического регулирования. М., «Советское радио», 1967.
3. Малиновский Б. Н. Цифровые управляющие машины и автоматизация производства. Л., Машгиз, 1963.
4. Сб. «Машинный анализ микроскопических объектов». Под ред. акад. Г. М. Франка. М., «Наука», 1968.

Поступила в редакцию
11.12 1970 г.

Кафедра
грунтоведения и инженерной геологии,
Лаборатория аэрометодов
грунтоведения и инженерной геологии.
