

Е.И. Дюхина, О.А. Беленко

## Определение размеров и морфологии грубодисперсной фракции аэрозолей на основе компьютерного анализа микроизображений

*Сибирская государственная геодезическая академия,  
Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 28.01.2004 г.

Представлена методика определения размеров и морфологии грубодисперсной фракции аэрозолей, основанная на анализе цифровых микроизображений, а также приведены результаты ее апробации на примере частиц двух типов. Было проанализировано около 300 частиц, образовавшихся в результате пожара. Эти частицы были отобраны в период комплексной международной экспедиции в Красноярском крае. В результате компьютерного анализа были определены такие характеристики частиц, как форма, площадь, периметр, количество. На основе этого был проанализирован дисперсный состав грубодисперсной фракции аэрозолей в дымовом шлейфе лесного пожара. Для частиц золы и угольного порошка, отобранных на барнаульской ТЭЦ, сформированы их стереоизображения, на основе обработки которых получены объем и площадь поверхности, а также трехмерная модель исследуемой частицы.

### Введение

В результате различных технологических и природных процессов образуются аэрозольные частицы разной формы и химического состава. Они играют решающую роль во многих атмосферных процессах (облако- и осадкообразование, радиационный теплообмен, видимость). Мощным источником атмосферных аэрозолей в Сибири являются лесные пожары и тепловые электростанции [1–5]. Образованные при этом частицы оказывают существенное влияние на качество окружающей среды, климат и химию атмосферы. Для изучения закономерностей образования аэрозольных эмиссий от лесных пожаров необходимы данные о микрофизических характеристиках аэрозольных частиц. Одной из важных составляющих, определяющих свойства аэрозолей, является их дисперсный и химический состав. В настоящее время уже накоплен значительный материал о химическом составе аэрозольных частиц как субмикронной ( $d < 1$  мкм), так и грубодисперсной фракции аэрозольной эмиссии [1–4]. Последняя в основном образуется за счет превращения в процессе сгорания биомассы лесных горючих материалов. В это же время сведения о дисперсном составе грубодисперсной фракции еще очень малочисленны [5]. Первые оценки важной суммарной массовой концентрации аэрозольных эмиссий указывают на то, что вклад грубодисперсной фракции может быть существенным [6]. Другим не менее важным обстоятельством является неправильная геометрическая форма частиц грубодисперсной фракции [6]. Так, при сжигании твердого топлива в котлах современных ТЭЦ уголь применяется в виде угольного порошка крупных ( $d < 20$  мкм) частиц неправильной формы [7].

Традиционные методы определения дисперсного состава таких частиц основаны либо на измерении отдельных характеристик непосредственно под микроскопом, что является трудоемким процессом, либо на сравнительном анализе их микроскопических изображений. Эффективным средством анализа морфологии частиц неправильной геометрической формы являются современные компьютерные технологии [8].

В данной статье рассмотрены возможности применения геоинформационных технологий для определения морфометрических характеристик аэрозольных частиц. Для получения их изображений применялся оптический микроскоп. В процессе экспериментальных работ обрабатывалось два типа частиц: образованных при пожаре, которые были получены в период комплексной международной экспедиции в Красноярском крае, и частиц угольного порошка, отобранных на барнаульской ТЭЦ.

Целью работы являлась оценка возможности применения геоинформационных технологий для определения морфометрических характеристик аэрозольных частиц по их микроизображениям.

### Методика

Отбор проб аэрозольных частиц первого типа выполнен в период комплексной международной экспедиции в Красноярском крае «Пожарный медведь» [9]. Экспедиция проводилась с целью комплексных многолетних исследований, связанных с восстановлением растительного покрова лесных массивов после пожаров, с загрязнением атмосферы продуктами горения, изучением интенсивности и скорости распространения огня в зависимости от вида растительности,

погодных и климатических условий, уровня влажности лесных горючих материалов, а также характера ландшафта местности. Отбор проб аэрозолей проводили с использованием импактора открытого типа. В нем аэрозольные частицы осаждались на вращающиеся стеклянные пластинки [10]. Затем стекло с осевшими частицами помещалось под микроскоп и фотографировалось. На рис. 1 приведен пример микроскопического изображения таких частиц, а на рис. 2 — пример стереопары частиц угольного порошка, используемого в топочных горелках.

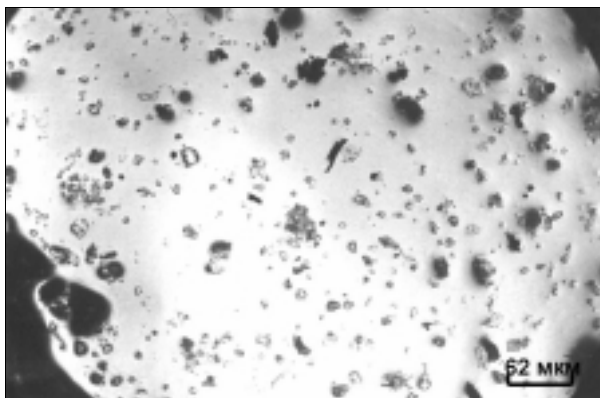


Рис. 1. Пример микронизображения частиц

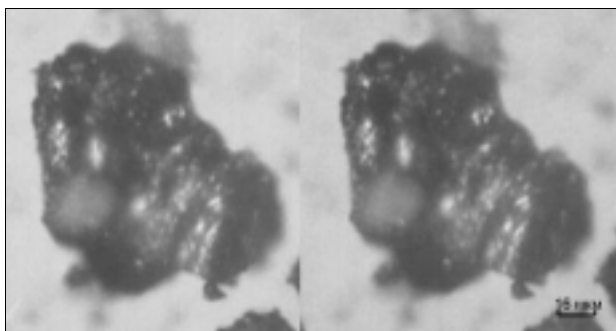


Рис. 2. Стереопара изображений частиц угольного порошка

Для определения характеристик этих частиц использовалась фотограмметрическая методика обработки изображений, реализуемая средствами ГИС Map Info [14]. Методика состояла из следующих операций:

1. Выполнялась привязка растрового изображения по заданным координатам минимум трех точек изображения в выбранной системе координат.

2. Производилась векторизация растрового изображения для идентификации формы частиц. Так как объекты имеют сложную форму, использовался ручной способ векторизации.

3. Определялись морфометрические характеристики изучаемых объектов с использованием стандартных функций Map Info. На первом этапе средствами Map Info были получены площадь и периметр каждой частицы. На втором этапе вычислялись характерные диаметры по формулам [11, 12]:

$$d_{1экв} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \quad d_{2экв} = \frac{P}{\pi}, \quad (1)$$

где  $d_{1экв}$  — диаметр эквивалентной сферы, площадь которой равна площади измеряемой частицы неправильной формы;  $d_{2экв}$  — диаметр эквивалентной сферы, периметр которой равен периметру той же частицы.

Все вычисления проводились в электронных таблицах EXCEL. Всего было измерено 300 частиц. Вычисления выполнялись в следующем порядке: полученные значения эквивалентных диаметров, площадей и периметров располагались по возрастанию, определялись минимальные и максимальные значения для этих характеристик, разбивались на 6 фракций в геометрической прогрессии:

$$q = \sqrt[6]{d_{iэкв}^{max} / d_{iэкв}^{min}}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где индекс 1 относится к эквивалентному размеру по площади; индекс 2 — по периметру; индексы max и min относятся к максимальным и минимальным эквивалентным диаметрам.

Результаты такого разбиения представлены в табл. 1.

Таблица 1

1	Площадь, мкм <sup>2</sup>			Периметр, мкм		
	2	3	4	5	6	7
<i>i</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>n<sub>i</sub></i>	<i>n<sub>i</sub>/300</i>	<i>P<sub>i</sub></i>	<i>n<sub>i</sub></i>	<i>n<sub>i</sub>/300</i>
1	12,48	1	0,003	3,46	1	0,003
2	31,47	17	0,057	5,95	23	0,0767
3	88,64	111	0,37	10,3	139	0,463
4	227,84	221	0,737	12,89	229	0,763
5	616,64	268	0,833	30,91	280	0,933
6	1577,44	295	0,983	51,39	295	0,983
7	4560,64	300	1	92,85	300	1

В табл. 1 в первом столбце указан номер размерной фракции для измеренных площадей (второй столбец) и периметров (пятый столбец). В столбцах 3 и 6 приведено число частиц ( $n_i$ ), размер которых не превышает значений  $S_i$  и  $P_i$ . В столбцах 4 и 7 приведены относительные доли (накопленная вероятность) значений  $S_i$  и  $P_i$ . Для определения закономерности, описывающей функцию распределения периметров и площадей, использовалась логарифмически нормальная аппроксимация следующего вида:

$$\frac{\delta s}{\delta \ln d_{1экв}} = \frac{\exp\left[\left(-\ln^2 \frac{S}{S_{50}}\right) / 2\delta_s^2\right]}{\sqrt{2\pi}\delta_s}$$

и

$$\frac{\delta p}{\delta \ln d_{2экв}} = \frac{\exp\left[\left(-\ln^2 \frac{P}{P_{50}}\right) / \delta_p^2\right]}{\sqrt{2\pi}\delta_p}, \quad (3)$$

где  $\delta_s = \ln \delta_{gs}$ ,  $\delta_p = \ln \delta_{gp}$ .

Параметры распределений в формуле (3) находились методом наименьших квадратов по соотношению

$$Y = a + bX, \quad (4)$$

где  $Y_i = \Phi^{-1}(y_i)$ ;  $X_i = \ln(n_i/300)$ ;  $\Phi^{-1}(y_i)$  — функция, обратная интегралу вероятности, ее значения

находились в [13, табл. 2]; коэффициенты  $a$  и  $b$ , а также коэффициент  $r$  аппроксимирующего экспериментальные данные соотношения (4) приведены в табл. 2. По значениям  $a$  и  $b$  параметры  $P_{50}$ ,  $S_{50}$  (медианные эквивалентные размеры периметра и площади),  $\delta_{gp}$  и  $\delta_{gs}$  (дисперсия логарифмов эквивалентных диаметров по периметру и площади) вычислялись по формулам:

$$P_{50}(S_{50}) = \exp(-a/b),$$

$$\delta_{gp}(\delta_{gs}) = \exp(1/b). \quad (5)$$

Эквивалентные диаметры рассчитывались по формуле (1).

Таблица 2

Площадь					
$a$	$b$	$r$	$S_{50}$ , МКМ	$\delta_{gs}$	$d_{50\text{экв}}$ , МКМ
-2,2518	0,987	0,994	157	2,75	14,1
Периметр					
$a$	$b$	$r$	$P_{50}$ , МКМ	$\delta_{gp}$	$d_{50\text{экв}}$ , МКМ
-4,6181	1,7827	0,989	53,4	1,78	13,3

Кроме того, по стереопаре была построена компьютерная трехмерная модель угольной частицы.

Стереопары микроизображений частиц были получены с помощью оптического микроскопа с фотонасадкой. Съемка производилась полупрофессиональной малоформатной фотокамерой Nikon, изображение получено с увеличением 50 крат.

Для формирования стереопары объект смещался препаратоводителем между экспозициями параллельно продольной стороне кадра. В этом случае съемка выполняется с параллельным положением оптических лучей и, следовательно, глубина резкости одинакова для обоих снимков, что существенно для формирования стереоизображений.

Для перевода фотографических изображений в цифровые предусматривался процесс сканирования.

Компьютерная обработка полученных цифровых стереоизображений выполнялась по программе, реализующей фотограмметрическую обработку, созданную средствами Matlab.

Эта программа позволяет обрабатывать стереопары разных масштабов, при этом для внешнего ориентирования модели предусмотрено использование как опорных точек, так и известных расстояний между двумя точками. Последовательность процессов обработки включает:

1. Заполнение сертификата и внутреннее ориентирование снимков [15].
2. Взаимное ориентирование снимков по шести стандартно расположенным точкам [15].
3. Внешнее ориентирование модели [15].
4. Определение пространственных координат точек, идентифицирующих элементов изучаемых структур биологических и других объектов.
5. Вычисление количественных характеристик (расстояний, площадей и т.п.).

В процессе обработки было измерено около 110 точек изображения частицы, определены коор-

динаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  этих точек. Были получены площадь и периметр. Для визуализации результатов полученные файлы пространственных координат измеренных точек экспортировались в программу Surfer. Средствами этой программы сформирована цифровая модель объекта на основе аппроксимации исходной информации. Полученная модель в виде трехмерной поверхности представлена на рис. 3.

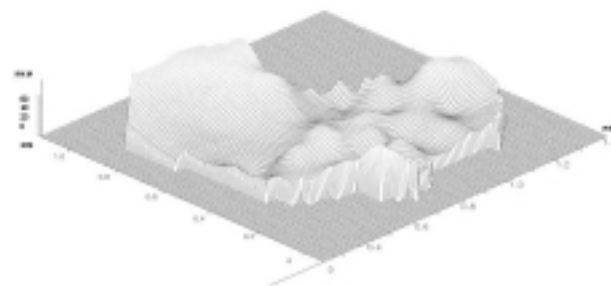


Рис. 3. Цифровая модель частицы

## Выводы

1. Проведенные исследования показали эффективность компьютерных технологий для определения морфометрических характеристик аэрозолей грубодисперсной фракции. Применение таких технологий обеспечивает высокий уровень автоматизации работ, расширяет набор определяемых количественных характеристик и повышает точности их определения по сравнению со стандартными методиками.

2. Спектр размеров площадей и периметров частиц грубодисперсной фракции аэрозолей достаточно хорошо описывается логарифмически-нормальным распределением.

3. Определены параметры этих распределений как для площадей, так и для периметров частиц грубодисперсной фракции.

4. Результаты статистического анализа аэрозольных частиц, образовавшихся в результате лесных пожаров, показали, что медианные эквивалентные размеры, определенные по значениям периметра и площади, близки друг к другу. Однако диапазон размеров ( $\delta_g$ ) при определении эквивалентного диаметра по измеренным периметрам существенно отличается от аналогичной величины, вычисленной из измеренных площадей частиц. Это указывает на то, что для частиц различных размеров форма частиц неизоморфна.

Авторы благодарны Л.К. Трубиной и К.П. Куценогому за помощь при написании статьи.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке ИП СО РАН № 169.

1. Куценогий К.П., Куценогий П.К. Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сиб. экол. ж. 2000. Т. 7. № 1. С. 11–20.
2. Koutsenogii K.P., Makarov V.I., Kovalskaya G.A., Smirnova A.I., Smolyakov B.S., Pavlyuk L.A. The chemical composition on the aerosol particle produced by the forest fires in Siberia // Proc. The Joint Fire Sciences Conference and Workshop. Grove Hotel, Boise, Idaho, June 15–17, 1999; «Crossing the Millennium:

- Integrating Special Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management». University of Idaho, 2000. V. II. P. 219–222.
3. *Koutsenogii K.P., Samsonov Y.N., Makarov V.I., Conard S., Baker S., Hao W. M., Mc Rae D.* Ecological consequence wildland fire in Siberian boreal forest. Maero and Trau Elements // Proc. of XXI Workshop, 2002, Leipzig/ Eds. M. Anke, R. Muller, U. Schafer, M. Stoppler. Leipzig: Schubert-Verlag, 2002. P. 464–470.
  4. *Куценогий К.П., Самсонов Ю.Н., Чуркина Т.В., Иванов А.В., Иванов В.А.* Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах Центральной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 461–465.
  5. *Куценогий К.П., Самсонов Ю.Н., Дюхина Е.И., Беленко О.А.* Грубодисперсная компонента аэрозольной эмиссии при лесных пожарах: Тезисы докл. X Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 2003. С. 25.
  6. *Куценогий К.П., Валендин Э.Н., Буфетов Н.С., Барышев В.Б.* Эмиссия аэрозолей от крупного лесного пожара в Сибири // Сиб. экол. ж. 1996. Т. 5. № 1.
  7. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 427 с.
  8. *Fletcher R.A., Small E.A., Scott J.H.J.* Analysis of individual collected particles // Aerosol Measurement / Ed. by P.A. Baron, K. Willeke. Wiley — Interscience, 2001. P. 295–363.
  9. *Самсонов Ю.Н., Куценогий К.П., Иванов А.В., Иванов В.А.* Мощность и химический состав аэрозольных эмиссий в атмосфере при лесных пожарах. Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия // Матер. 5-й Междунар. конф. 30 июня — 5 июля 2003 г. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. С. 170–171.
  10. *Noll K.E.* A roal inertial impactor for sampling giant particles in atmosphere // Atmos. Environ. 1970. V. 4. P. 9–19.
  11. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955. 351 с.
  12. *Baron P.A., Sorensen C.M., Brockmann J.E.* Nonspherical particle measurements: Shape Factors, Fractals and Fibers // Aerosol measurement / Ed. by P.A. Baron, K. Willeke. Wiley — Interscience, 2001. P. 705–749.
  13. *Ван дер Вар ден. Б.Л.* Математическая статистика. М.: Изд-во иност. лит-ры, 1960. 434 с.
  14. *Map Info Professional.* Руководство пользователя. Русская версия.
  15. *Лобанов А.Н., Буров М.И., Краснопецев Б.В.* Фотограмметрия: Учебник для вузов. М.: Недра, 1987. 308 с.

***E.I. Dyukhina, O.A. Belenko. Determination of size and morphology of the coarse aerosol fraction from computer analysis of microimages.***

This paper reports both the method for determining the size and morphology of the coarse-disperse aerosol fraction based on the analysis of digital microimages and the results of its testing using particles of two types. We analyzed about 300 particles formed from fires. These particles were collected during the combined international expedition in the Krasnoyarsk region. From computer analysis we determined the following characteristics of particles: shape, area, perimeter, and amount. These data served the basis for analyzing the disperse composition of the coarse-disperse aerosol fraction in the smoke plume of forest fire. For soot particles and carbon dust sampled at the Barnaul heat station, we obtained their stereoimages, which were then used to estimate the volume and surface area and to develop the 3D model of the particle studied.