

А.С. Козлов, А.Н. Анкилов, А.М. Бакланов, А.Л. Власенко, С.И. Еременко,
С.Б. Малышкин

Исследование механических процессов образования субмикронного аэрозоля

Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Дан обзор механических процессов и участвующих в них материалов, производящих субмикронный аэрозоль. Исследованию подвергались процессы пересыпания, качения, разлома, разрыва и удара. Приведены характеристики аэрозоля, образующегося в результате указанных процессов. Охвачен широкий спектр материалов. Более детально рассмотрен механизм образования аэрозоля при пересыпании песка. Показано, что данный процесс потенциально может служить значимым источником субмикронного аэрозоля в аридных зонах.

Введение

Атмосферные аэрозоли самым широким образом вовлечены в круговорот обменных процессов, происходящих на нашей планете. Вопрос об источниках атмосферного аэрозоля затрагивает практически каждая работа в данной области. В последнее время с развитием теоретических и экспериментальных методов внимание ученых привлечено к субмикронным аэрозольям, составляющим основное количество находящихся в атмосфере частиц. Традиционными источниками субмикронного аэрозоля над континентом считаются горение и фотохимические процессы [1]. При этом практически не уделяется внимания значительному числу механических процессов, также приводящих к образованию субмикронных частиц [2].

Недостаток знаний в данной области выявил необходимость провести экспериментальный обзор наиболее распространенных механических процессов, потенциально приводящих к образованию субмикронного аэрозоля.

Результаты и обсуждение

Первым шагом на пути выполнения поставленной задачи было создание необходимой экспериментальной базы. Был разработан и изготовлен ряд установок для исследования процессов пересыпания, качения, разлома, разрыва и удара. Был опробован широкий спектр процессов и материалов. В таблице обобщенно приведены полученные характеристики аэрозоля, образующегося в различных процессах.

Как видно, практически все представленные процессы приводят к образованию аэрозоля, размером менее 1 мкм. Причем в ряде случаев (бумага, сталь) образующийся аэрозоль имеет бимодальное распре-

деление по размерам и часто его диаметр не превышает десятков нанометров. О потенциальной значимости для окружающей среды может свидетельствовать, например, процесс образования аэрозоля при пересыпании песка.

Характеристики аэрозоля, образующегося в различных механических процессах

Материал	Производительность, шт.	Размер частиц	Процесс
Резина-латунь	$1,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$	10–15 нм	Удар
Резина	$3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$	10–25 нм	Качение
Гетинакс	»	10–15 нм	»
Бумага	$6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$	< 3 нм, 15–20 нм	Разрыв
Стекло	$2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$	5–20 нм	Разлом
Графит	$7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$	0,4 мкм	»
Сталь	10^{10} см^{-2}	<3 нм, 20 нм	Разлом
Песок	$40 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, при 15 см/с^*	0,4 мкм	Пересыпание
Силикагель	$140 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, при 15 см/с^*	»	»

*Скорость перемещения поверхности в наших экспериментах.

Образование аэрозоля в процессе пересыпания песка

Следующим шагом после установления факта генерации аэрозоля являются оценка практической значимости и разработка модели исследуемого процесса. Наиболее изученным на текущий момент является процесс образования аэрозоля при пересыпании песка.

Процесс перемещения песков под воздействием ветра постоянно происходит на пустынных территориях [3]. Появление аэрозоля в процессе пыльных

бурь также известно [4]. В нашей постановке эксперимента пересыпание песка происходит внутри вращающейся банки и не под воздействием воздушного потока. Линейная скорость пересыпания соответствует скорости ветра 5–8 м/с. Оценки показывают, что 2–3 км поверхности песка, при указанных параметрах генерации (см. таблицу), могут создавать в атмосфере концентрацию аэрозоля, сравнимую с естественной. Принимая во внимание, что аридные территории составляют до 40% суши, данный механизм может давать существенный вклад в состав континентального аэрозоля.

В рамках работы проводились исследование поверхности частиц песка на сканирующем электронном микроскопе (рис. 1) [6], а также измерение концентрации и спектра размеров «песчаного» аэрозоля с помощью фотоэлектрического счетчика (рис. 2).

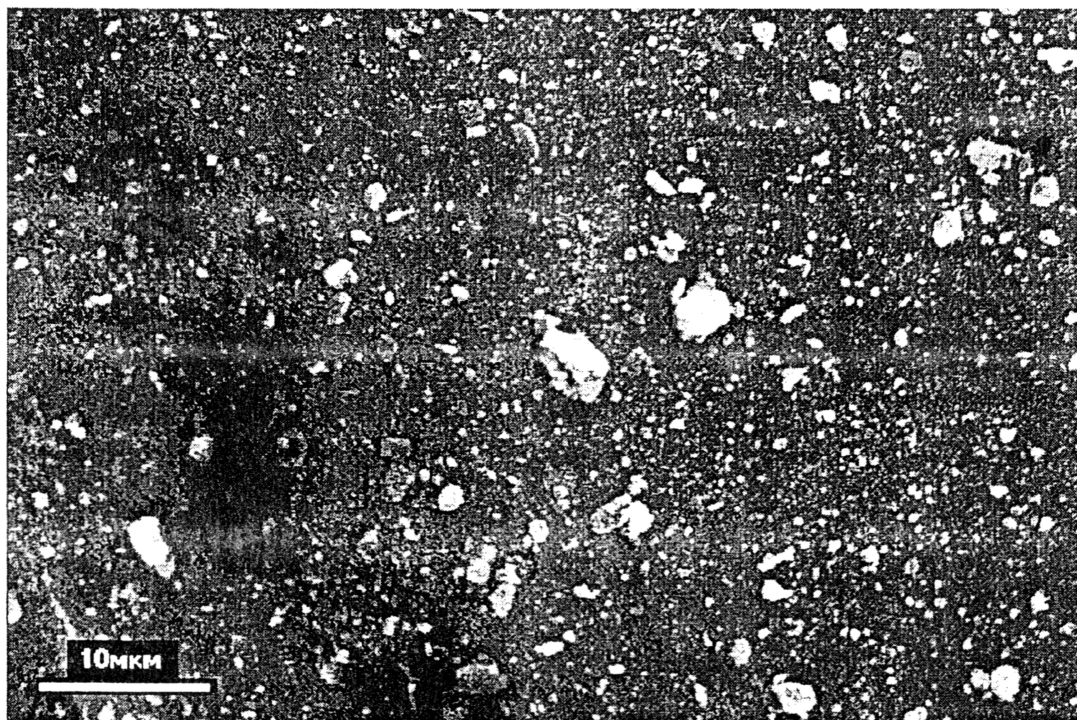


Рис. 1. Микрофотография поверхности частицы песка, полученная на сканирующем электронном микроскопе

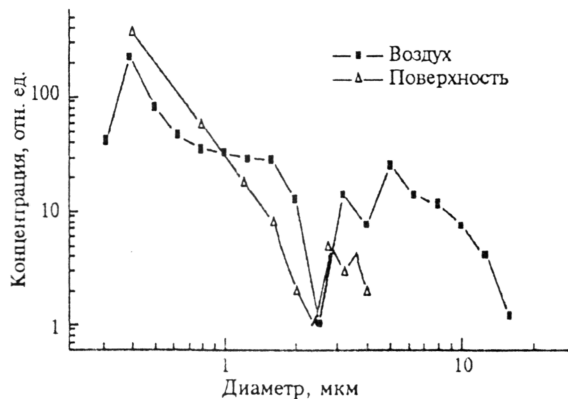


Рис. 2. Распределение частиц по размерам на поверхности песчинок и в воздухе

Обработка микрофотографий (см. рис. 1) показала наличие на поверхности песчинок около 30 частиц на 100 мкм^2 . Спектр их распределения как в аэрозоле, так и на поверхности – бимодальный (см. рис. 2). Объяснить такой характер спектра можно, предположив, что частицы на поверхности песчинок имеют атмосферное происхождение.

Для интерпретации процесса была предложена следующая качественная модель:

Начальные предположения

1. Частицы песка представляются шариками размером $D = 10^{-1} \text{ см}$.
2. На поверхности песчинок в адсорбированном состоянии находятся частицы размером $d = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.
3. За удерживание частиц на поверхности ответственны силы Ван-дер-Ваальса.

Оценка энергии рассматриваемых взаимодействий

1. Предполагается, что основным инициатором образования аэрозоля является соударение частиц песка между собой. Для оценки принято, что при соударении песчинка падает с высоты собственного размера. В этом случае энергия соударения выражается следующим образом:

$$E_1 = \pi \rho g D^4 / 6 = 0,1 \text{ эрг},$$

где $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$ – плотность частиц песка; D – их размер; $g = 10^3 \text{ см/с}^2$ – ускорение свободного падения.

2. Величину энергии адгезии для частицы размером $0,4 \text{ мкм}$ на плоской поверхности можно вычислить по нижеприведенной формуле [5]:

$$E_2 = -Ad / (12x) = 6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг},$$

где $A = 10^{-13}$ эрг – энергетическая константа; $d = 0,4 \times 10^{-4}$ см – размер удерживаемых частиц; $x = 0,5 \cdot 10^{-7}$ см (5 Å) – зазор между частицей и поверхностью.

3. Величину электростатического взаимодействия частицы с поверхностью для пары элементарных зарядов также несложно оценить:

$$E_3 = -\frac{e^2}{2x} = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ эрг},$$

где $e = 5 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ.

Энергия частицы на поверхности может быть вычислена из максимальной скорости падения песчинки

$$V = \sqrt{2gD} = 14 \text{ см/с}.$$

Следовательно, кинетическая энергия, которой обладает частица:

$$E_4 = mV^2/2 = 8 \cdot 10^{-12} \text{ эрг},$$

где $m = 8 \cdot 10^{-14}$ г – масса частицы.

Из вышеизложенного следует, что энергия, которой обладает частица на поверхности, значительно превышает энергию адгезии и энергии возможного электростатического взаимодействия, а значит, возможно инерционное «стряхивание» частиц с поверхности песчинок. Принимая во внимание значительную величину кинетической энергии частицы, можно предположить, что скорость ее вылета с поверхности практически равна максимальной скорости падения песчинки, т.е. 14 см/с.

Далее следует оценить, достаточно ли этой энергии для преодоления частицей вязкого подслоя, окружающего песчинку при обтекании воздухом.

Величина вязкого подслоя для частицы песка δ может быть оценена согласно следующей формуле:

$$\delta^2 = 2\frac{\eta}{\rho} \frac{D}{V_\infty} \approx \frac{1}{4} \frac{D}{V_\infty} \Rightarrow$$

$$\delta \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ см} = 400 \text{ мкм}.$$

Здесь η и ρ – вязкость и плотность воздуха; $V_\infty = 15$ см/с – скорость обтекающего потока.

Расстояние l , на которое частица уйдет от поверхности, далее можно легко определить:

$$l = VV_s/g = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 0,5 \text{ мкм},$$

где $V_s = 2 \cdot 10^{-3}$ см/с – скорость седиментации 0,4 мкм частицы.

Из вышесказанного следует, что вылетевшая частица не в состоянии самостоятельно преодолеть вязкий подслей. Однако даже внутри подслоя имеется ненулевая скорость потока воздуха.

Скорость обтекающего потока V_l на расстоянии вылета частицы, при допущении, что на границе подслоя она равна $V_\infty = 15$ см/с, вычисляется следующим образом:

$$V_l = V_\infty (l/\delta) = 4 \cdot 10^{-2} \text{ см/с},$$

а предположив, что вылетевшая частица мгновенно приобретает скорость окружающего потока, можно оценить максимальное время t сноса частицы от поверхности песчинки как размер последней, деленный на скорость потока V_l :

$$t = D/V_l = 2,5 \text{ с}.$$

При этом другие возможные механизмы оказываются гораздо менее эффективными. Так, диффузионное преодоление вязкого подслоя заняло бы

$$t_D = \sqrt{\delta^2/D} \approx 40 \text{ с},$$

где $D = 1,6 \cdot 10^{-6}$ см² – коэффициент диффузии вылетающей частицы.

Таким образом, качественно процесс заключается в следующем. В процессе соударения песчинок при пересыпании с их поверхности «стряхиваются» частицы, которые вылетают внутрь вязкого подслоя на расстояние порядка собственного размера и сносятся за пределы песчинки током воздуха внутри подслоя. Далее вылетевшая в межпесчиночное пространство частичка сносится обтекающим потоком в свободную атмосферу.

Заключение

Необходимо еще раз подчеркнуть, что образование субмикронного и даже нанометрового аэрозоля в механических процессах, исследованных в данной работе, по-видимому, может составить значимую конкуренцию фотохимическим процессам и горению, как традиционным источникам частиц размером менее микрона в атмосфере. Так, в результате исследований выделен потенциально значимый источник атмосферного субмикронного аэрозоля для аридных зон континента – процесс движения песка, для которого предложена качественная модель.

1. Pandis S.N., Wexler A.S., Sienfeld J.H. // J. Phys. Chem. 1995. № 99. P. 9646–9659.
2. Хаякава И. Чистые помещения. М.: Мир, 1990.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955.
4. Sviridenkov M.A., Gillette D.A., Isakov A.A., Sokolik I.N., Smirnov V.V., Belan B.D., Panchenko M.V. et al. // Atm. Env. 1989. V. 27A. № 16. P. 2481–2486.
5. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976.
6. Andronova A.V., Gomes L., Smirnov V.V., Ivanov A.V., Shukurova L.M. // Atm. Env. 1989. V. 27A. № 16. P. 2487–2494.

A.S. Kozlov, A.N. Ankilov, A.M. Baklanov, A.L. Vlasenko, S.I. Eryomenko, S.B. Malyskhin. Investigation of mechanical processes of submicron aerosol generation.

Combustion and photochemistry are considered as traditional sources of submicron aerosol in continental boundary layer of the atmosphere. At the same time significant number of mechanical sources of submicron particles is practically set aside. The present work is dedicated to the experimental review of the most prevalent mechanical processes and materials producing submicron aerosol. The processes of interspersing, rolling, break, severance and blow have been investigated. Aerosol characteristics for different processes and material are presented.

The mechanism of aerosol generation during sand interspersing is examined in more details. This process estimated to be a significant source of submicron aerosol in deserted areas.